

多谱段复杂红外场景模拟技术

李卓, 高彦泽*, 张金英**

北京理工大学光电学院, 北京 100081

摘要 多谱段复杂红外场景模拟技术是红外成像制导半实物仿真系统试验的关键技术,其技术特性限制了整个仿真平台的总体性能。实现多谱段复杂红外场景模拟的技术途径主要包括电阻阵列、光热图像转换阵列、数字微镜、液晶空间光调制器、红外发光二极管阵列、相变材料阵列、可调发射率半导体屏、量子点下转换芯片、光致发磷光材料、光子晶体等。本文回顾了多谱段复杂红外场景模拟技术的发展历史,介绍了典型技术的实现原理,讨论了每种技术的相对优点和缺点,并总结了国内外主要研究机构的研究现状。最后,对这些技术的性能参数进行了比较。

关键词 成像系统; 红外; 多谱段; 复杂红外场景生成; 半实物仿真试验

中图分类号 TP391.9 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230756

1 引言

随着红外成像制导技术被广泛应用于各种进攻性和防御性精确制导设备,红外成像制导半实物仿真技术得到巨大发展^[1-3]。在实验室进行导弹飞行试验和夜视传感器测试,能够大幅度降低外场实验的费用。由此体现了红外成像制导半实物仿真试验系统开发的重要性。红外成像场景模拟技术是红外成像制导半实物仿真技术中的关键技术之一,红外场景模拟装置主要用于在不同的红外光学波段上复现多种类型的光学目标、背景和干扰等光学环境。如今的光学探测系统是复杂、高帧频、高动态范围、多光谱、高分辨率甚至还有距离信息的场景敏感系统。主要的传感器包括导弹导引头、前视红外系统(FLIR)、目标跟踪装置和自动目标识别装置。虽然近些年红外场景生成技术有了长足的进步,但是,目前的红外场景模拟技术还不具备能够检验这些复杂光学探测的能力,仍然需要针对不同探测体制的光学探测系统的半实物仿真试验需求研究复杂红外场景模拟装置。

本文综述了多谱段复杂红外场景生成技术。根据红外场景生成的机理,将目前的红外场景生成器件分为辐射型和调制型两类。介绍了辐射型和调制型红外场景生成技术的实现原理,这些技术包括电阻阵列、光热图像转换阵列、数字微镜器件(DMD)、液晶空间光调制器、红外发光二极管(LED)阵列、相变材料阵列、可调发射率半导体屏、量子点下转换芯片、光致发磷光材料、光子晶体等。本文对每种技术分别进行了介绍,

并讨论了它们的优点和缺点。

2 红外场景生成技术的特点

要描述各种多谱段复杂红外场景模拟技术的特点,需要先明确以下的名词概念。

1) 光谱波段

指红外场景模拟装置发射或调制的光谱波段。光谱类型可分为黑体、灰体、激光、窄带光谱等类别。许多研究人员认为,红外目标模拟器所模拟的红外目标的实际发射光谱并不重要,因为窄带光谱同样可以在被测的成像传感器探测波段内产生与实际目标辐射谱等效的辐射功率。多谱段红外场景模拟的定义是模拟装置可以同时生成和投射两个以上特定的光谱特征的图像,有些多谱段红外场景模拟器在使用过程中其光谱是可以调谐的。

2) 阵列规模和填充因子

阵列规模是描述以阵列格式(例如,512 pixel×512 pixel)表示的发射或调制的图像元素(像素)的数量。像素有效辐射面积对应于像素能辐射红外辐射的部分,而像素总面积对应于由相邻像素中心距离(也称为像元间距)确定的部分。像素有效辐射面积与像素总面积的比值定义为填充因子。

3) 发射率

发射率描述的是红外场景模拟装置的发光器件的像素的辐射出射度与相同温度的标准黑体的辐射出射度之比,一般指半球发射率。发射率参数仅适用于辐射型模拟装置。

收稿日期: 2023-03-30; 修回日期: 2023-04-30; 录用日期: 2023-05-06; 网络首发日期: 2023-05-24

基金项目: 国家重点研发计划(2018AAA0100301)、国家自然科学基金(62174012)

通信作者: *gao_yanze@bit.edu.cn; **jyzhang@bit.edu.cn

4) 时间特性和闪烁特性

红外场景模拟装置产生的辐射从辐射最大值的 10% 到 90% 所需的时间称为上升时间,从最大值的 90% 到 10% 所需的时间称为下降时间,上升时间和下降时间一般不相等,除此之外,在最大值 90% 以上的时间称为保持时间。一些研究人员更喜欢称时间常数为 e 指数下降时间。无论定义如何,它都是描述一个像素发射或调制红外辐射通量的速度的特征。时间特性在应用上一般可以用实现的最大图像帧频来表述。

闪烁特性是描述相邻帧之间信息衰减趋势的一种特征。有些红外场景生成设备包括一个保持电路,使辐射单元一直处于当前帧写入信息对应的辐射状态,直到下一帧信息刷新才更换成下一帧写入信息对应的辐射状态,这类模拟装置的特性称为“无闪烁”。还有一类模拟装置的像素强度实时被写入,并不会有“保持”的状态,例如 DMD。

5) 温度范围

温度范围是指用辐射计或带有测温功能的热像仪测得的由红外场景模拟装置生成的红外目标(点源或图像)的实际温度范围。由于温度范围通过实测获得,因此温度范围参数实际上已经包含了填充因子和发射率的影响。

6) 温度分辨率

温度分辨率是指红外场景模拟装置的发光元件(或辐射调制元件)的像素在接收最小可控的输入物理量变化后,所产生的最小红外辐射变化对应的最小等效黑体温度变化,例如:电阻阵列的像素在接收到最小输入电流变化时产生的等效黑体温度变化,光热图像转换阵列的像素在接收到最小输入光能变化时产生的等效黑体温度变化,DMD 的像素在增加最小“开态”时长后产生的等效黑体温度变化。

7) 串扰

串扰描述在像素辐射过程中由于衍射和热传导等因素而流入相邻像素的辐射通量。

8) 均匀性

均匀性描述的是红外场景模拟装置的发光元件(或调制器件)的不同像素在接收到同样辐射强度的指令输入后,本应产生相同的辐射通量时,不同像素产生的辐射通量的差别。均匀性可以使用校准技术进行部分校正。

9) 对比度

对比度是指同一幅图像中目标与背景辐射的差值除以目标和背景辐射之和。通常,对比度被指定为系统可达到的最大对比度。

10) 动态范围

动态范围是指温度范围(或在某些情况下指辐射范围)除以模拟装置的最小可控的温度(或辐射)分辨率。

3 辐射型动态场景生成技术

3.1 电阻阵列

1) 技术原理

电阻阵列是以互补金属氧化物半导体(CMOS)和微机电系统(MEMS)技术在硅基片上制作的微电阻结构阵列。当微电阻通过电流时,电阻会产生热量升温并产生红外辐射。对特定的微电阻单元施加一定的电流从而控制其温度,可以控制电阻阵列产生温度场分布,进而辐射出红外图像。电阻阵列产生的红外辐射光谱覆盖了中波和长波两个波段。电阻阵列的辐射强度与微电阻的温度、填充因子和材料的发射率有关,微电阻的温度、填充因子和材料的发射率越高,则辐射强度越大。

电阻阵列的温度范围和最高温度由加载在微电阻上的电功率和通过绝热层的热传导损失共同决定。电阻阵列的温度分辨率指的是电阻阵列像素最小可控的电流变化,所产生的最小等效黑体温度变化。电阻阵列的时间常数主要由电阻单元的材料性质所决定,满足如下关系:

$$\tau = \frac{C}{G} = \frac{mc}{G} = \frac{\rho Vc}{G}, \quad (1)$$

式中: C 为电阻单元的热容; G 为电阻单元的热导率; m 为加热电阻的质量; c 为材料的比热容; V 为电阻的体积; ρ 为电阻材料的密度。提升电阻的响应速度可以通过减小热质量或增大热导率来实现。

2) 技术的实现途径

电阻阵列的发展经过了硅桥电阻结构、薄膜电阻结构和悬浮薄膜电阻结构等三个阶段^[4]。电阻阵列最早期的结构为硅桥电阻结构,如图 1(a)所示,Z字形的电阻桥位于U形槽上,底部是硅衬底,控制电路位于U形槽的一侧,这种结构可以在短时间内升温但是其占空比低且消耗功率大,因此很难实现大规模阵列。之后发展的薄膜电阻结构如图 1(b)所示,它由一层薄电阻层、聚酰亚胺绝热层和硅衬底组成,硅衬底与热沉相连,这种结构容易实现高占空比,但是由于相邻像元之间没有隔离,因此热串扰严重,难以实现较高的温度。第三阶段电阻阵列为悬浮薄膜电阻结构,如图 1(c)所示,两条支撑腿将介电薄膜支撑悬空,这种结构既可实现高的占空比又能降低热串扰。因此悬浮薄膜电阻是目前电阻阵列的主要技术手段^[5]。对于电阻阵列而言,介电材料需要具备较小的比热容、较好的热稳定性、较高的机械强度和较低的热导率。常用的材料为氮化硅。针对高温应用的介电材料一般采用难熔金属的化合物或碳的同素异形体。

电阻阵列的基本电路是以行和列连接的电阻矩阵,每行和每列由相应的行列线连接,若要选通特定的电阻则将电流施加到对应的行线和列线。图 2 为电阻阵列一个基本单元的电路原理图,其中包含两个金属

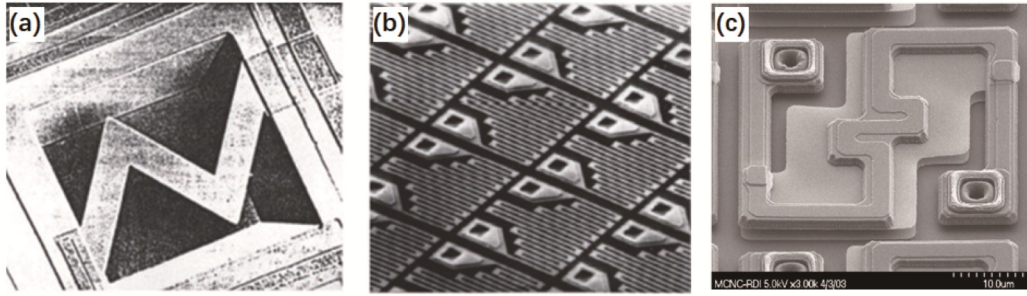


图 1 电阻阵列三种结构的扫描电镜图^[4]。(a)硅桥电阻;(b)薄膜电阻;(c)悬浮薄膜电阻

Fig. 1 Scanning electron microscopy images of three types of resistance array structures^[4]. (a) Silicon bridge resistance; (b) thin film resistance; (c) suspended thin film resistance

氧化物半导体(MOS)晶体管(T_1 、 T_2),一个发射电阻和一个电容。当电阻阵列开始工作时,地址线上的信号控制通过加热 T_1 选通,信号通过 T_1 传到 T_2 的栅极,命令线上的信号通过控制 T_2 的漏电流来改变发射电阻的施加功率。当单元选通结束后,存储在电容里的电荷经过 T_2 缓慢放电,从而短暂地维持对发射电阻的加热状态。由于选通结束后电容的放电回路的时间常数较大,因此电阻在整个帧时的温度保持稳定,不需要进行图像刷新。

另外,帧频还与控制电路的图像刷新模式有关,一是使用快照模式同时对所有电阻单元进行刷新,二是使用扫描模式对电阻阵列进行逐行逐点的扫描,使用快照的寻址模式会使阵列具有更快的响应速度和更高的帧频。

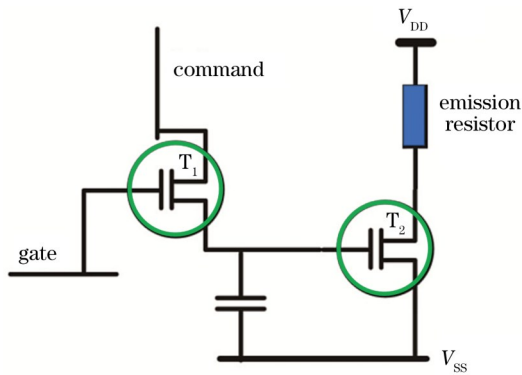


图 2 电阻阵列基本单元的电路原理图

Fig. 2 Circuit schematic diagram of basic unit of resistance array

3) 主要研究单位

国外研究具有代表性的公司有美国的 Honeywell 公司、SBIR 公司以及英国的 BAE 公司。主要型号包括 Honeywell 公司研制的 BRITE 系列,SBIR 公司研制的 MIRAGE 系列和 BAE 公司研制的 TPS 系列^[6]。

国内对于电阻阵列的研究是从 20 世纪 90 年代开始的,主要研究单位有中国科学院上海技术物理研究所,经历了几十年的发展已取得一定成果^[7-8]。

4) 技术特点和目前的技术状态

Honeywell 公司为美国怀特空军实验室 CRISP 项目研制的 512×512 阵列规模的电阻阵列,可模拟最低 20 K 的温度,研制的悬浮薄膜电阻阵列可实现 1024×1024 阵列规模,并且应用于美国导弹司令部^[9]。SBIR 公司的 MIRAGE 系列电阻阵列的最高阵列规模为 1536×768 和 1024×1024 ,中波波段 ($3 \sim 5 \mu\text{m}$) 温度范围为 285~675 K,长波波段 ($8 \sim 12 \mu\text{m}$) 温度范围为 285~525 K,中波温度低于 325 K 时温度分辨率小于 40 mK,高于 325 K 时温度分辨率小于 100 mK,帧频范围为 20~200 Hz。经非均匀性校正后,器件辐射的非均匀性小于 1%。同时 SBIR 公司还发展了低温型号,最低温度为 50 K。通过优化像元材料、结构和读入集成电路(RIIC),SBIR 的电阻阵列正向着更高温度、更高帧频的方向发展^[9-11]。目前大阵列规模的电阻阵列多使用 512×512 电阻阵列拼接而成^[12]。

国内电阻阵列的研究受工艺水平限制,较难实现高阵列规模^[13]。中国科学院上海技术物理研究所研制的薄膜型电阻阵列为 256×256 阵列,中波最高温度为 523 K,长波温度为 423 K,帧频为 200 Hz;悬浮薄膜电阻结构 256×256 阵列填充因子大于 40%,中波最高温度为 623 K^[8, 14-16]。

3.2 光热图像转换阵列

1) 技术原理

光热图像转换阵列是基于光热效应的红外场景生成器件,可实现将可见光图像转换为红外图像的功能,其工作原理如图 3 所示。光热图像转换阵列上每个像

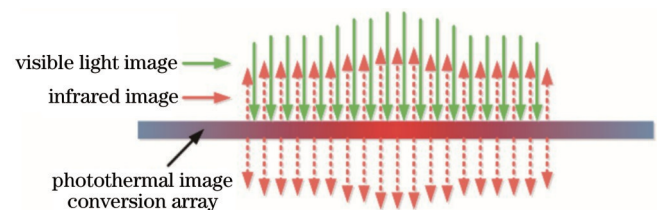


图 3 光热图像转换阵列的工作原理示意图

Fig. 3 Working principle schematic of photothermal image conversion array

元对可见光波段具有高吸收率,对红外波段具有高发射率,且具有非常低的热质量,在吸收少量可见光能量时就能使像元温度迅速升高。在工作时将一幅可见光图像投射在光热图像转换阵列上,在阵列表面形成与可见光图像灰度相对应的温度场分布,并对外辐射红外能量,从而生成一幅红外图像^[3]。

采用光热图像转换阵列作为红外外场景生成器件的红外场景模拟装置一般包括写入光图像生成系统、光

热图像转换阵列、红外投影光学系统,如图 4 所示。写入光图像生成系统用于生成反映目标红外特征的写入光图像,并将写入光图像成像到光热图像转换阵列的表面,光热图像转换阵列被封装在真空腔中,在工作时,将真空腔内部抽真空,以抑制像元与空气的对流换热,提高光热转换效率,光热图像转换阵列将写入光图像转换为红外图像后,再通过红外投影光学系统将红外图像投射到被测红外探测系统的入瞳处^[17-18]。

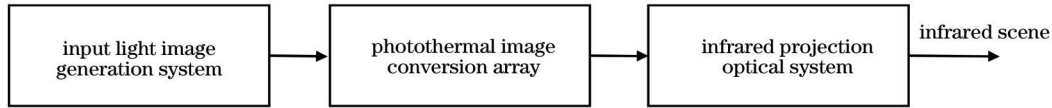


图 4 采用光热图像转换阵列的红外场景生成系统框图

Fig. 4 Block diagram of infrared scene generation system using photothermal image conversion array

2) 技术的实现途径

光热图像转换阵列发展到现在共经历了超薄均匀薄膜、带有微结构的自悬浮薄膜以及在硅基底上制备的悬浮薄膜等三个阶段。

超薄均匀薄膜是最早的基于光热转换效应的红外外场景生成器件^[19],包括极薄(薄膜厚度直径比约 1:200000)的聚酰亚胺衬底以及在衬底一侧的金属黑吸收膜层,薄膜表面无微结构,其原理是写入光照射在薄膜表面时由于薄膜很薄,热质量很小,所以薄膜表面迅速升温,薄膜表面不同位置的写入光的光强不同造成薄膜表面不同位置的温度升高不同,在薄膜表面形成温度场分布,进而形成红外辐射场分布。薄膜表面温度的降低是依靠薄膜表面内的热传导实现的,而薄膜表面内的热扩散特性与薄膜的物理性质、薄膜的厚度、写入光的强度及其写入的持续时间有关。由于当时的工艺水平限制,薄膜的厚度只能做到亚微米量级,而且薄膜直径只有 50 mm 左右。这就需要比较大的写入光功率,但是写入光功率如果太大薄膜就有可能被损坏(聚酰亚胺薄膜的分解温度在 350 °C 左右),所以这种器件的温升、空间分辨率和图像帧频都不高,不能满足红外成像制导半实物仿真试验的需求。

带有微结构的自悬浮薄膜技术采用 MEMS 工艺在自悬浮薄膜表面制备了微结构,并在微结构之间留有传导热的散热通道,每一个微结构可以看作是一个“像元”。此时单个像元具有很低的热质量,可以在吸收写入光后迅速升温,且依靠像元周围的散热通道,迅速将像元上的热量传导出去,在像元升温 and 降温的过程中实现动态平衡。带有微结构的自悬浮薄膜在薄膜面积、温度范围和图像分辨率等性能上获得了大幅提升。但带有微结构的自悬浮薄膜由于薄膜厚度比较薄,厚度在 200 nm 左右,所以机械强度较差,同时,由于是自悬浮形式,不能使用主动散热措施,只能依靠薄膜自身的热传导特性散热,因此在生成高温和高帧频的红外场景时具有一定的局限性^[20-22]。

在硅基底上制备的悬浮薄膜采用硅材料作为衬底,使转换像元悬浮在衬底上的微腔或微柱上。这种结构提供了在硅基底上调控像元热传导性能的途径,在硅基底上可以增加散热结构。在硅基底上制备的悬浮薄膜的机械强度以及所能模拟的红外图像的温度范围、阵列规模、帧频等特性都获得了显著提升^[23-25]。

3) 主要技术特点

基于光热图像转换阵列器件的红外场景模拟技术的优点包括:a)易于制备成大规模阵列,因此生成的红外图像具有高分辨率的特点,目前带有微结构的自悬浮薄膜的像元阵列规模达到 1400×1400,在硅基底上制备的悬浮薄膜的阵列规模达到 2200×2200;b)可以直接采用技术成熟的可见光图像生成装置(如投影仪等)作为写入光图像生成系统;c)辐射的光谱覆盖中波红外(3~5 μm)和长波红外(8~12 μm)两个波段,辐射的光谱类型为黑体辐射谱;d)可在超低温环境下工作,光热图像转换阵列可直接置于低温环境中工作,器件本身温度可与环境温度相同,能够生成具有纯净低温背景的红外场景,适用于在冷舱中进行的红外制导半实物仿真试验。光热转换像元的最高温度一般不超过 600 K。由于器件本身热交换主要依靠材料本身的物理特性,所以一般情况下,图像帧频在 100 Hz 左右。图 5 为光热图像转换阵列生成的红外图像。

4) 主要研究单位

目前光热图像转换阵列的主要研究单位是北京理工大学目标仿真实验室,从 1990 年至今,目前已形成具有完全自主知识产权的产品体系,产品已应用于多个型号的红外成像制导系统的半实物仿真试验中。

5) 目前的技术状态

最早的超薄均匀薄膜又被称为 Bly 薄膜,是美国陆军夜视与光电实验室(U. S. Army Night Vision and Electro-Optics Laboratory)的 Bly^[19]在 1980 年制成的,Bly 薄膜包括一层极薄的硝酸纤维衬底,以及镀在衬底一侧的金属黑膜层。2000 年,法国弹道和空气动力



图 5 光热图像转换阵列生成的红外图像。(a)数字输入图像;(b) 3~5 μm 红外图像;(c) 8~12 μm 红外图像
Fig. 5 Infrared images generated by photothermal image conversion array. (a) Input digital image; (b) 3~5 μm infrared image; (c) 8~12 μm infrared image

研究实验室利用厚度约 40 nm 的硝酸纤维薄膜生成了空间分辨率为 512 pixel \times 512 pixel、帧频为 50 Hz、最高温度为 383 K 的长波红外动态场景。

北京理工大学目标仿真实验室从 1990 年开始相关研究,采用聚酰亚胺(PI)薄膜作为衬底,采用 MEMS 工艺在薄膜表面制备微像元,得到带有微结构的自悬浮薄膜,在时间响应、温度范围、图像分辨率等参数上均获得了较大提升^[26-27]。1990—2019 年期间,对带有微结构的自悬浮薄膜的物理机制和制备工艺进

行了深入研究,建立了带有微结构的自悬浮薄膜的热传导理论模型,分析了其温度特性、辐射特性、辐射时间特性和辐射空间特性等的变化规律,在此基础上对薄膜的微观设计和制备工艺进行了优化和改进^[28-32]。采用 PI 作为衬底,采用金黑或铝黑作为吸收可见光和辐射红外光的材料,并将微像元设计成具有“双 S”形状的结构,如图 6 所示。带有微结构的自悬浮薄膜的像元阵列规模约为 1400 \times 1400,最高温度为 489 K,最高帧频约为 100 Hz。

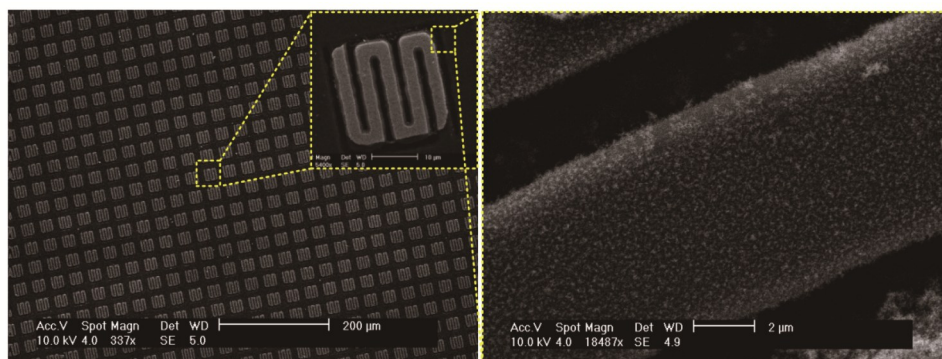


图 6 北京理工大学研制的具有微结构的自悬浮薄膜^[32]
Fig. 6 Self-suspended thin film with microstructure developed by Beijing Institute of Technology^[32]

2020—2022 年,北京理工大学在硅基底上制备了微腔型悬浮薄膜,该硅基底上制备的悬浮薄膜的阵列规模为 1024 \times 1024,帧频约为 72 Hz,在环境温度低至 107.8 K 的冷舱中产生红外图像的最高温度为 426.15 K^[33-36]。并从实验上证明了多维热调控策略可提升硅基底上制备的悬浮薄膜结构的稳态和瞬态热辐射性能^[37],如图 7 所示。

2023 年,北京理工大学对硅基微腔型悬浮薄膜进行了改进,使光热转换像元悬浮在两个硅柱上,如图 8 所示。这种结构进一步抑制了像元间的面内热传导,并可通过控制硅柱的尺寸调控像元与基底之间的热交换,这种硅基悬浮薄膜的最高温度和帧频特性都获得了显著提升,目前有效阵列规模达到 2200 \times 2200,最高温度为 550.8 K,最大帧频约为 200 Hz^[38]。

4 调制型动态场景生成技术

4.1 DMD

1) 技术原理

DMD 是美国德州仪器公司(Texas Instruments, TI)于 1987 年推出的一种反射式空间光调制器件。DMD 是利用微机械加工工艺制作的微反射镜片单元阵列,每一个微反射镜片单元是一个像素。通过控制微反射镜片不同的偏转状态对照明光源进行强度调制。图 9 为 DMD 的实物照片与微反射镜片的扫描电镜照片。红外 DMD 的微反射镜反射包括红外中波和长波在内的宽谱光,因此可以对红外光源进行强度调制。红外 DMD 封装时使用透射红外材料作为保护窗口,使得红外光能够通过这个窗口。DMD 一般有二值模式和脉冲宽度调制(PWM)两种模式^[39]。红外场

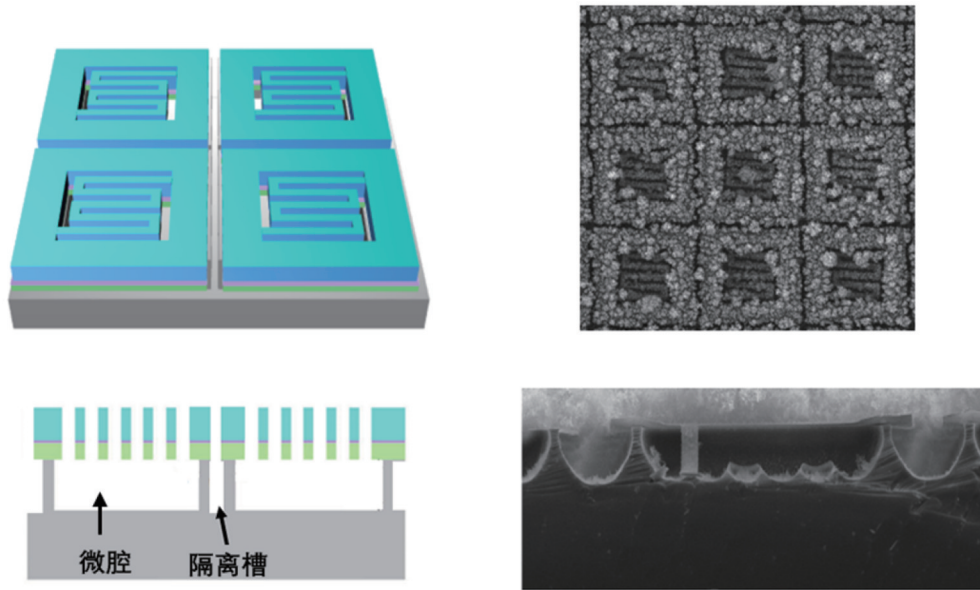


图 7 硅基底上制备的悬浮薄膜^[37]
Fig. 7 Suspended thin film prepared on silicon substrates^[37]

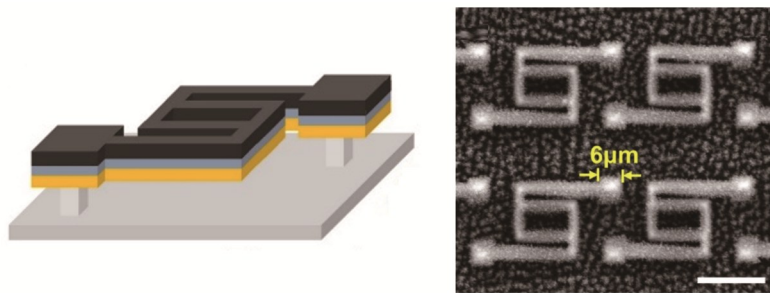


图 8 硅基悬浮薄膜^[38]
Fig. 8 Silicon based suspension thin film^[38]

景生成装置多采用脉宽调制工作体制。计算机场景生成系统产生的图像数据通过脉冲宽度调制电路控制 DMD 镜片的开关状态生成红外图像。在脉宽调制工作体制下,若 PWM 与红外探测系统的采集时间不同步就会出现图像闪烁、抖动等一系列问题。为了避免

出现这种情况,DMD 的信号处理电路需要外接红外探测系统的同步信号。通过同步电路保证 DMD 显示的图像与红外探测系统采集的图像保持同步,以获得最佳的图像质量^[40]。

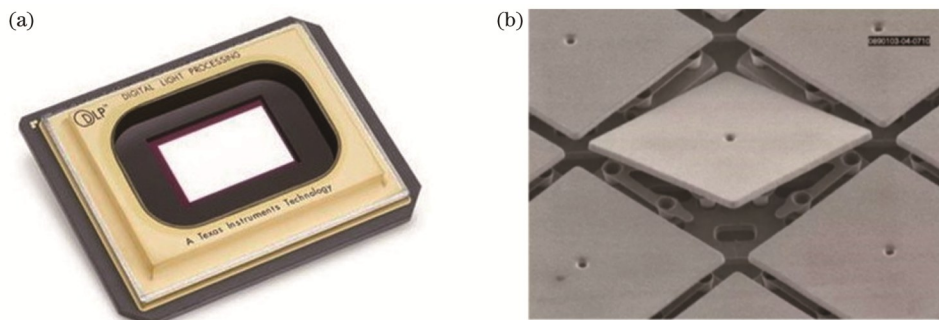


图 9 DMD^[39]。(a) DMD 实物照片;(b) DMD 像元的扫描电镜图
Fig. 9 Digital micro-mirror device (DMD)^[39]. (a) Photo of DMD; (b) scanning electron microscopy image of DMD pixels

DMD 是安装在 CMOS 存储单元上的微反射镜阵列,每一个微反射镜代表一个像元。图 10 描述了微镜

的开/关状态。当 DMD 处于不工作状态时,所有微反射镜处于水平状态。当 DMD 开始工作时,驱动电路

将计算机生成的图像的灰度信号转换为脉宽信号, 接收到脉宽信号的 CMOS 存储单位将输出相应的驱动脉冲信号。当存储单元值为“1”时, 该存储器所对应的微镜转向 $+12^\circ$, 微镜处于打开状态, 反射光线将通过投影光学系统投射出去, 红外辐射将垂直入射到投影

光学系统中; 当存储单元值为“0”时, 该存储器所对应的微反射镜转向 -12° , 微反射镜处于关闭状态, 反射的红外辐射不能进入投影光学系统。通过对 CMOS 存储单元的 1/0 状态进行控制, DMD 可通过不同的脉冲持续时间(脉冲宽度)实现不同灰度等级^[41]。

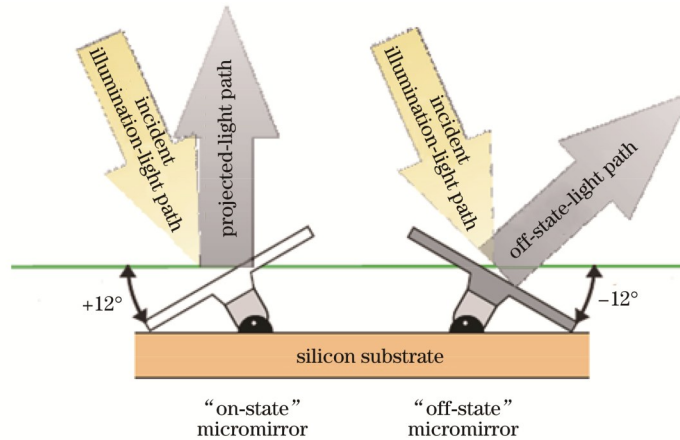


图 10 DMD 的开/关状态^[41]

Fig. 10 On/off state of DMD^[41]

2) 主要技术特点

美国的 Optical Sciences Corporation (OSC) 公司对 TI 公司生产的多种型号的 DMD 进行窗口更换实现红外场景生成, 其中常用的分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ (XGA 型) 和 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ (SXGA 型), 中波对比度为 250:1, 在 24 bit 灰度下 XGA 型 DMD 最高支持 230 Hz, SXGA 型 DMD 的帧频超过 230 Hz; 在 8 bit 灰度下两个型号最高支持 690 Hz, 最高照明光源等效黑体温度可达 800 K ^[42]。

美国海军投资的 OPTRA 公司对中波红外 DMD 的研究起步较早, 开发了基于 DMD 的双波段中红外场景投影系统, 该系统采用两个 DMD, 分别模拟 $3.4 \sim 4.2 \mu\text{m}$ 和 $4.2 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 波段, 投射图像的灰度等级为 10 bit 时帧频为 40 Hz, 灰度等级为 8 bit 时帧频为 160 Hz, 最高温度达到 785 K , 图像对比度为 250:1^[43]。

国内关于 DMD 的研究相对国外较晚, 近年来已取得了许多成果^[44]。以哈尔滨工业大学、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、西北工业大学、长春理工大学为代表研制的 DMD 型红外场景模拟器主要使用 TI 公司生产的 XGA 型 DMD 芯片, 阵列规模为 1024×768 , 像元尺寸为 $13.68 \mu\text{m}$ 。中国科学院上海技术物理研究所提出了改进型脉宽调制方式, 其研制的红外场景投影系统可以实现最高 12 bit 的灰度等级, 帧频最大为 120 Hz^[45]。长春理工大学报道的双波段 DMD 红外场景模拟器采用两个 DMD 分别实现中波 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 和长波 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 双波段, 其中中波图像对比度达到 250:1, 长波图像对比度达到 14:1, 中波温度 $\geq 600 \text{ K}$, 长波温度 $\geq 400 \text{ K}$ ^[46-48]。洛

阳光电设备研究所设计了一种基于 DMD 的中波红外动态场景投影系统, 采用分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ 的 DMD 芯片, 温度模拟范围为 $-10 \sim +300 \text{ }^\circ\text{C}$, 最低温度分辨率为 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$, 8 bit 灰度等级时可实现 100 Hz 动态场景生成, 并可对外同步^[49]。

3) 主要研发单位

国外基于 DMD 的红外场景生成装置的主要研发单位包括美国的 OPTRA 公司、Optical Sciences 公司、美国军事仿真中心等。国内基于 DMD 的红外场景生成装置的主要研发单位包括哈尔滨工业大学、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、西北工业大学、长春理工大学、北京理工大学、中国科学院上海技术物理研究所和西安 205 研究所等。

4) 目前的技术状态

DMD 技术的进步带动了红外场景投影技术的发展^[50]。美国的 TI 公司拥有关于 DMD 芯片几乎所有的核心专利, 并且也是国际上唯一可以生产高性能 DMD 芯片的公司, 因此国内关于 DMD 红外投影系统的 DMD 芯片主要依赖进口。国内研制的 DMD 红外投影系统主要集中在中波红外, 关于 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段的研究较少, 其主要原因为像元尺寸接近长波红外波长, 衍射现象严重从而极大降低了投射图像的质量, 因此红外图像的对比度较低^[51-53]。另外, DMD 的灰度范围是通过脉宽调制实现的, 因此基于 DMD 的红外场景投影仪必须与被测单元严格同步, 并且 DMD 的显示时间与被测单元的积分时间也要相匹配, 否则将采集到不完整的图像灰度, 导致探测器单元采集的信号会出现闪烁和对比度等级低的现象。

4.2 硅基液晶空间光调制器

1) 技术原理

硅基液晶(LCoS)空间光调制器由美国休斯飞机公司于1970年代研制,该技术已经广泛应用于投影显示技术中,包括高清投影电视、办公室投影仪、相机取景器、头戴式显示器和微型投影仪等^[54]。LCoS空间光调制器图像显示原理与普通液晶显示的原理相似,利用液晶的电调制光学特性改变入射光束的偏振或相位^[55]。LCoS技术限制其用于红外场景生成的因素在于在红外波段LCoS的图像对比度较低和图像帧频较慢,且由于光源是黑体所以最高温度也有一定限制^[56]。

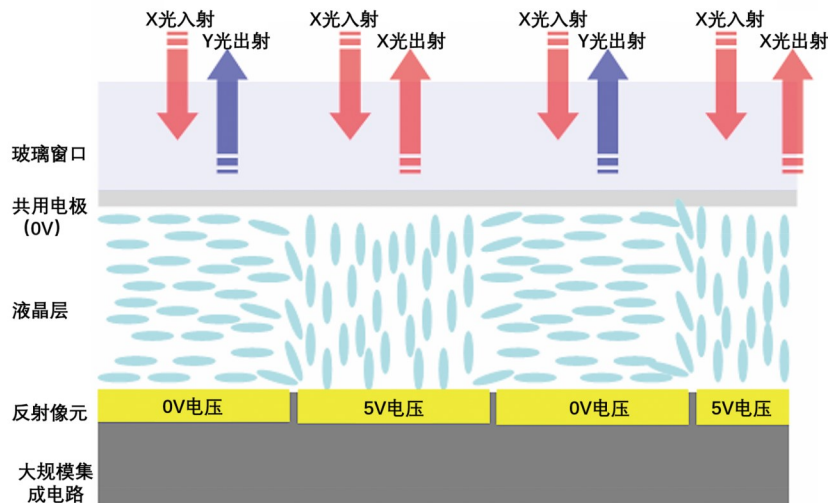


图 11 LCoS的结构和工作原理示意图^[56]

Fig. 11 Schematic diagram of structure and working principle of LCoS^[56]

3) 主要研发单位

主要研发单位为美国休斯飞机公司、Dygnetics公司、BNS公司和佛罗里达大学。

4) 技术特点和目前的技术状态

红外LCoS的特点是分辨率高、帧频低,在长波波段比较困难。2005年,佛罗里达大学研制了基于 256×256 阵列LCoS空间光调制器的红外场景投影仪,像元间距为 $24 \mu\text{m}$,帧频为200 Hz,调制传递函数(MTF)为 21 lp/mm ^[56]。2006年,Dygnetics公司和BNS公司提出了基于 512×512 阵列LCoS空间光调制器的红外场景生成装置,像元间距为 $37.5 \mu\text{m}$,填充因子为87.6%,在中波波段达到了200 Hz帧频,获得了超过525 K的温度^[57-58]。2010年,美国Kent Optonics公司研制的基于 512×512 阵列LCoS空间光调制器的红外场景生成装置实现了长波红外模拟,最高温度 $>1500^\circ\text{C}$,帧频为200 Hz^[59]。

LCoS空间光调制器的响应时间与液晶层的厚度、材料特性和驱动电压有关。一般来说,LCoS的工作波长越长,液晶层厚度就越大,而厚的液晶层会使标准超大规模集成电路(VLSI)背板的高速操作变得困

2) 技术的实现途径

图11为LCoS的结构和工作原理示意图^[56]。LCoS的主要结构类似于三明治结构,其驱动电路制作在单晶硅基底上,每一个小单元包括CMOS晶体管电路开关存储电容和在其上方的反射面。驱动电路可控制加载在每个像元上的电压,电压通过液晶下面的金属层加载在每个LCoS像元对应的液晶层上,使其产生外电场以改变液晶分子排列。不同的液晶分子排列对由线偏振光组成的入射光束形成不同程度的线偏转,不同偏转角度的线偏振光通过检偏器出射时透过率不同,这样出射光线的强度就会被调制,从而实现图像信息的显示。

难。因此,基于LCoS的红外场景生成装置需要高压背板和高双折射液晶材料。LCoS的上升时间(约1 ms)比下降时间(10~100 ms)快,其响应时间随着液晶层厚度的降低而减小,由此为了获得较快的响应速度还应保持较薄的液晶层。因此LCoS很难在长波波段具有较短的响应时间。另外由于其驱动电压过高、器件结构复杂等原因限制了其在阵列规模上的进一步突破^[60]。国内关于LCoS空间光调制器应用于红外场景生成的报道较少,最近几年在国际上关于LCoS用于红外场景生成装置的最新进展也鲜有报道。

5 其他动态场景生成技术

5.1 红外LED阵列

1) 技术原理

红外LED阵列通常采用半导体材料利用光子在量子阱结构导带和价带间的跃迁实现发光。中波红外LED器件包括带间级联激光器(ICL)、量子级联激光器(QCL)、II型超晶格LED(SLEDs)和基于铋化物的LED。ICL由多个量子阱组成,电子首先从价带激发到导带中的较高能级,然后通过随后的带间跃迁激发

到导带中的较低能级,通过控制 ICL 中的电流使得导带中产生粒子数反转并产生多次带间跃迁,红外光就是通过多个量子阱中价带和导带之间的一系列带间跃迁产生的。QCL 也是基于多量子阱的器件,其主要由 III-V 族半导体制成,红外光是通过多量子阱在导带内的一系列带内跃迁产生的^[61]。II 型 SLEDs 是由一系列不同半导体材料的交替薄层组成的超晶格结构,其中一种材料的导带高于相邻材料的价带,电子和空穴被限制在超晶格内的不同区域,当给 SLEDs 施加电压时,电子和空穴被注入超晶格然后在两种不同材料的界面处重新复合,这种复合会通过带间跃迁产生红外光,光的波长由两种材料的能带差决定^[62]。铟化物基 LED 的工作原理与普通 LED 类似,都是基于电子和空穴的带间跃迁实现发光,通常采用铟化铟(InSb)或铟化铟镓(InGaSb)等直接带隙材料制成,通过沉积 p 型和 n 型的铟基材料形成 p-n 结,当向 p-n 结施加正向偏置电压时,电子和空穴在 p-n 结处重新结合并以光的

形式释放能量^[63]。与其他红外 LED 器件相比,ICL 和 SLEDs 的效率更高,因此常用于产生红外辐射^[64]。图 12 为采用 InAs/GaInSb/AlSb 材料制成的 ICL 在正向偏压下的两个周期的能带图,n 型 InAs/Al(In)Sb 注入层既是前一区域的集电极,又是后一区域的发射极,两个 p 型接触层之间的有源区由多个级联的有源/注入周期组成,每个周期包括一个不对称的 InAs/GaInSb/InAs“W”量子阱^[65]。在正向偏压下,电子从注入区注入到 E_e 能级,该能级位于相邻 GaInSb 层的带隙区中,由于 E_e 能级中的电子被阻止直接隧穿出 GaInSb 和 AlSb 层,因此电子倾向于在相邻的价带量子阱中弛豫到空穴态 E_h ,在这个过程中发射出光子。由于强的空间带间耦合,处于 E_h 状态的电子可以通过隧穿越过薄的 AlSb 势垒和 GaSb 层进入下一个注入区的导带,并为下一次带间跃迁和光子发射做好准备。量子级联层的优点是可以持续利用载流子进行有效的光子发射,即使其从有源发射区有序传输到下一个有源区。

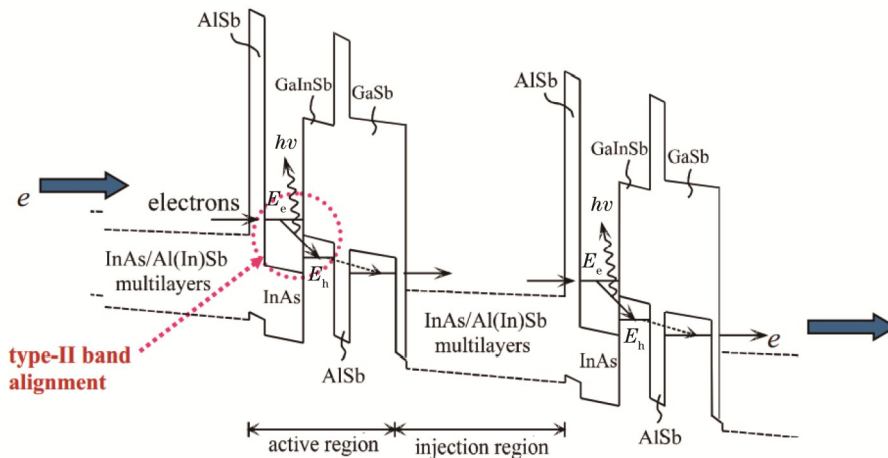


图 12 ICL 在正向偏压下的两个周期的能带图^[65]

Fig. 12 Two period energy band of ICL under forward bias^[65]

2) 技术的实现途径

铟化镓(GaSb)是一种直接带隙半导体材料,室温禁带宽度为 0.70 eV,可用于制备 2~5 μm 波段的红外 LED。随着 GaSb LED 技术的发展,基于 LED 的动态红外图像生成器的研制在高帧频、高温范围等方面有了很大进步。中波红外 ICL 阵列的制作步骤主要为:先在 GaSb 基板上利用分子束外延(MBE)技术生长周期性第二型量子阱结构,再利用感应耦合等离子体刻蚀技术刻蚀 LED 平台,利用等离子体化学气相沉积法沉积硅氮化合物,然后在上下接触层都进行 Ti/Au 金属电极的沉积,最后将接触柱体烘干并利用倒装法固定在 CMOS 集成驱动电路上。图 13(a)为红外 LED 的结构示意图,图 13(b)和 13(c)分别为红外 LED 阵列和单个 LED 在显微镜下的照片^[66]。

3) 主要技术特点

红外 LED 的技术特点在于其可以实现较大的温

度范围,其发光光谱是线光谱。随着阵列规模的增大,LED 阵列加工工艺和控制电路也变得十分复杂,因此大阵列规模的红外 LED 的制备是 LED 阵列的一个难点。另外,红外 LED 的工作温度较低,需要搭配制冷系统一起使用,在室温下工作的红外 LED 具有非常低的电光转换效率,对于大面积封装的商用 LED 器件而言,其最大连续输出功率不超过 300 μW ^[67-68]。2008 年,美国陆军研究实验室采用 MEMS+CMOS 工艺研制的 64×64 阵列规模的 SLEDs 阵列,发射波长为 3.8 μm ,帧频为 1 kHz。中红外波段 ICL 阵列在室温和液氮环境下分别可实现温度为 605 K 和 1050 K^[69-70]。2014 年,美国特拉华大学和爱荷华大学的研究团队联合研发了 InAs/GaSb SLEDs 投影系统,其工作温度在 77 K 以下,峰值波长约为 4.6 μm ,分辨率为 512 pixel×512 pixel,像素间距为 48 μm ,最大帧频为 100 Hz,3~5 μm 波段内测量得到对应 1350 K 的温度

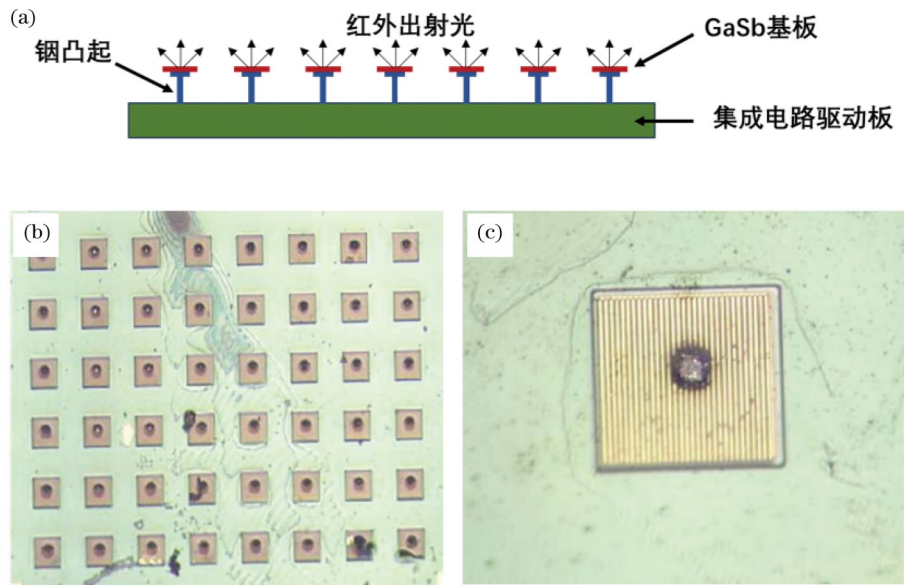


图 13 红外 LED 阵列^[66]。(a) 红外 LED 阵列示意图；(b) 红外 LED 阵列显微镜照片；(c) 单个红外 LED 显微镜照片
 Fig. 13 Infrared LED array^[66]. (a) Schematic diagram of infrared LED array; (b) microscope photo of infrared LED array; (c) microscope photo of single infrared LED

的峰值辐射为 $2.2 \text{ W/cm}^2/\text{sr}$ ^[71]。之后爱荷华大学研制了双色 SLEDs 系统 (TCSA) 和夜光 SLEDs 系统 (NSLED), TCSA 具有与原始 SLEDs 阵列相同的 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 的分辨率和 $48 \mu\text{m}$ 的像素间距, 每个像素都包含两个 LED, 液氮环境下辐射波长分别为 $3.2 \sim 4.2 \mu\text{m}$ 和 $4.2 \sim 5.2 \mu\text{m}$, 峰值波长分别为 $3.81 \mu\text{m}$ 和 $4.72 \mu\text{m}$, 最高模拟温度分别为 1800 K 和 1470 K ^[72-73]。NSLED 系统的分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$, 像素间距为 $24 \mu\text{m}$ 。这两个系统中每个红外 LED 都采用了两个晶体管来驱动。2016 年, 特拉华大学的研究团队研制了分辨率为 $1000 \text{ pixel} \times 1000 \text{ pixel}$ 的红外 LED 阵列, 2018 年又进一步研发了分辨率为 $2000 \text{ pixel} \times 2000 \text{ pixel}$ 的红外 SLEDs 场景投

影仪 (HDILED)^[74-75]。

4) 主要研发单位

红外 LED 阵列的研究主要集中在国外单位, 包括美国陆军研究实验室、空军实验室、爱荷华大学及特拉华大学等, 其中代表性研究单位为爱荷华大学和特拉华大学。国内关于红外 LED 的研究主要集中在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的半导体激光器, 对红外 LED 阵列的研究主要集中在近红外波段, 波长集中在 $0.75 \sim 1.00 \mu\text{m}$ 范围。

5) 目前的技术状态

爱荷华大学和特拉华大学的研究团队十几年来一直在研究红外 LED 的红外场景投影系统^[76], 其研究成果如表 1 所示。

表 1 基于 SLED 系列的红外投影仪
 Table 1 Infrared projector based on SLED series

	SLED	TCSA	NSLED	HDILED TRL5	HDILED TRL6
Resolution / pixel	512×512	512×512	1024×1024	2048×2048	2048×2048
Spectrum region	Single band, mid-infrared	Dual bands, mid-infrared	Single band, mid-infrared	Single band, mid-infrared	Single band, mid-infrared
Pixel space / μm	48	48	24	24	24
Frame rate / Hz	100	1000	500	125	500
Year	2014	2016	2016	2018	—

特拉华大学的研究团队将红外 LED 场景投影技术从研发阶段发展到生产水平, 实现了 1000×1000 规模的红外 LED 阵列^[74]。该团队目前研制的最先进的红外 LED 阵列是 HDILED 系统, 具有 $2000 \text{ pixel} \times 2000 \text{ pixel}$ 的分辨率、 $24 \mu\text{m}$ 的像素间距和 $50.8 \text{ mm} \times 50.8 \text{ mm}$ 的物理尺寸, 目前红外 LED 阵列的研制正在往更高分辨率、更小像元尺寸和更高帧频等方向

发展^[75]。

SLEDs 的快速发展得益于整个投影系统中各个组件都具备灵活性, 通过模块化硬件和可扩展的固件可以实现较高的性能。目前最先进的中红外 LED 采用了应变超晶格材料和多量子阱结构, 其制备需要采用外延生长方法从而导致红外 LED 的制备成本昂贵且难以大批量生产^[77]。基于红外 LED 阵列的红外场

景生成技术具有高温度的优势,但是辐射谱段较窄,图像均匀性较差,且具有严重的沉积热,工作时需要使用充满液氮的杜瓦瓶保证其温度在 77 K 左右^[76]。目前距离工程应用还很远,还有很多工作要做。

5.2 相变材料阵列

相变材料是一种具有特殊性能的材料,受到外部激励(如光、热、电等)触发时拥有至少两种不同的相状态,不同的相状态之间可实现逆转或一直保持某种相状态不变。由于不同相状态在电学和光学性能上存在较大差异,因此相变材料可用来实现信息存储和光通信。硫族化物(GeSbTe、SbTe 和 GeTe 等)是目前常用的相变材料,其不同的相状态可以通过温度进行调控,由于具有较好的非易失性相变功能,因此常被用于研制随机存储器。硫族化物在不同的热处理方法下能够实现晶态和非晶态两种相状态,这两种相状态的折射率差异较大,另外其在可逆相状态之间转变很快,最高可达纳秒甚至皮秒量级,因此目前在光通信领域中具有很大的应用潜能^[78-79]。2022年,美国等离子公司与海军研究实验室提出了一种基于相变材料阵列的红外场景投影仪,通过温度控制硫族化物相变材料形成红外空间光调制器从而实现频率和幅度的动态调谐^[80]。

5.3 可调发射率半导体屏

通常半导体屏(硅、锗)对红外波段是透明的,当半导体保持在恒定较高温度时,给半导体屏照射的可见光(或近红外)光子能量大于带隙将激发许多自由载流子,由于自由载流子的存在,材料的吸收系数发生变化,被照射区域在红外波长下变得不透明,吸收系数的变化可以等效为红外辐射系数(红外发射率)的变化,因此可实现热辐射功率的调制。根据基尔霍夫定律和普朗克黑体辐射定律,被照亮的区域会发出红外辐射,红外半导体下转换屏基于以上原理能够实现红外场景模拟。乌克兰半导体物理所的 Malyutenko 等^[81]研究了基于锗或硅的半导体下转换屏,可实现超过 1 kHz 的帧频,由于使用了体硅材料,填充因子为 100%,表面工作区域为 100 cm²,模拟红外波段为 3~12 μm。国内西安应用光学研究所^[82]和上海机电工程研究所^[83]也对该技术进行了探索研究。

5.4 量子点下转换芯片

量子点(QD)是一种纳米半导体材料,由于具有一些新颖的光学和电学性能近年来备受关注。目前 QD 在电子、光电子、光伏、生物医疗等领域都具有广泛应用^[84]。由于量子效应,QD 表现出与尺寸相关的可调谐能带隙和发光性能。QD 在可见光和近红外领域的发展已经取得了不错的进展,但在红外中波和长波领域还具有很大的发展空间。为了获得短波红外和中波红外波段的光致发光性能,需要制备具有窄带隙(<0.4 eV)的 QD^[85]。在所有窄带隙半导体中,硫族化铅(即 PbS、PbSe 和 PbTe 材料)、HgTe 和 Ag₂Se 的 QD 材料被广泛研究,目前已有研究人员实现了中波

波段的红外发光。2018年,美国佐治亚理工学院的研究人员提出将 QD 制备在 PMMA 聚合物薄膜涂层中实现可见光到红外波段的场景转换^[86]。QD 在红外领域具有很大的发展空间和潜力,然而 QD 也有其自身的严重缺点,即稳定性较低,在空气中易氧化。QD 芯片生成的红外图像仍存在分辨率较低的问题,还需进一步优化和改进。

5.5 光致发磷光材料

磷光体(PH)是一种基于稀土元素并以掺杂 Cr、Pr、Yb、Nd 等的氧化物和氧硫化物为主体的材料。PH 在电磁辐射和离子射线的激发下进入激发态,然后在激发停止后能够发射出比入射光波长还长的光。早期一些 PH 材料作为电致发光材料被用于红外阴极射线管(CRT)实现红外场景生成。1987年,美国陆军夜视和电光学中心研制了红外 CRT,使用电子束照射在由磷光材料组成的屏幕上,被照射的地方将产生中波或长波的红外辐射^[87]。基于磷光材料的 CRT 存在阈值效应,当输入功率达到 4 W 时将探测不到红外信号,大多数的输入能量将转换为可见光而不是红外光。2000年,国内的昆明物理研究所也提出了基于红外 CRT 的场景模拟器,其工作波段为 8~12 μm,空间分辨率由电子束点(<60 μm)决定,采用帧频和余晖时间匹配的方式来解决图像匹配问题^[88]。然而,红外 CRT 还存在严重的余晖问题、帧频低(不超过 50 Hz)、总辐射强度低、工作时需要冷却且提高帧频的难度很大等缺点,近几年有关磷光材料的 CRT 已经鲜有报道。

近年来光致发光的 PH 材料得到了研究人员的关注,块状的 PH 通常可以使用固态反应制备而成,通过改变 PH 主体成分和掺杂剂类型可实现从近红外(~750 nm)到中波红外(~4 μm)的光致发光^[89-91]。2021年,美国磷光科技公司和佐治亚理工学院的研究人员提出了一种基于 PH 的下转换器实现红外场景生成^[92],指出当红外下转换器的吸收带与固态光源的发射带相匹配时可获得最佳的红外发射性能,红外图像的对比度可通过特定的窄带光源来增强。PH 下转换器在红外领域具有很大的发展空间和潜力,但高温和高湿度都会对其稳定性产生严重影响。

5.6 光子晶体

光子晶体应用于红外辐射领域的手段主要有两种:第一种是用来产生红外连续谱;第二种是用来实现对特定红外波长的全反射。

光子晶体光纤(PCF)是受二维光子晶体的启发所研制的,目前研究人员已经使用 PCF 研制了中红外波段的超连续谱^[93-94]。超连续谱指的是光脉冲在通过非线性介质后由于各种物理效应的作用,光谱最终得到较大展宽。光纤可提供长距离的非线性相互作用,因此利用光纤产生的超连续谱具有很好的空间相干性。为了获得中红外波段的超连续谱,光纤应具备较高的

色散调节灵活度。传统的阶跃光纤的色散特性的调节灵活度较低,而 PCF 具有很高的色散调节自由度,因此可通过改变 PCF 的几何参数对其色散特性进行调节^[88]。通过改变 PCF 纤芯与包层之间的折射率差值,使波导对光场的束缚得到增强,进而提高光纤的非线性系数。提高光纤的非线性系数对光学非线性效应来说非常有利,可用于产生超连续谱。

对光子晶体的结构进行调控可获得各种红外波段的光子带隙,因此利用光子晶体可实现对特定红外波长的强反射。通过调节光子晶体的带隙可以满足不同红外场景的应用需求,例如有研究人员利用光子带隙的高反射实现红外隐身,同时也有研究人员利用光子晶体增强红外波段而抑制其他波段^[95-96]。2010 年,美国 Cyan 科技公司和 Sandia 国家重点实验室合作研发了基于金属钨三维光子晶体的超高温红外场景生成技术^[96]。这个高温光子晶体红外场景辐射模拟器主要利用光子晶体通过自身结构实现对光波的调制以及带阻滤波的特性,达到对通过光子晶体的光通量的控制。该技术实质是对电阻阵列像元结构进行改进,通过优化光子晶体结构,实现期望波段的红外辐射增强而抑制其他波段。目前 Cyan 科技公司和 Sandia 国家重点实验室已经设计出中、长波双波段的 256×256 阵列器件,单像素可实现的最高温度为 $2000 \sim 3000 \text{ K}$ ^[96-97]。2012 年,北京理工大学和上海机电工程研究所提出了一种一维光子晶体红外空间光调制器,并对该光子晶体的光学传输特性进行了理论分析和仿真^[98]。基于红外光子晶体的器件结构复杂、加工难度较大,目前关于光子晶体在红外场景生成方面的应用报道较少。

6 复合红外场景模拟技术

复合红外场景模拟技术用于复合制导设备系统的半实物仿真试验,复合红外场景模拟技术又可以分为多光谱复合场景模拟技术、高光谱复合场景模拟技术、多模复合场景模拟技术等。

多光谱复合场景模拟技术^[99]和高光谱复合场景模拟技术^[100]所生成的红外场景包含所模拟目标和背景在某一波段内若干条较窄的光谱段内的特征,光谱线的宽度及光谱线的个数决定了是多光谱场景还是高光

谱场景。设每个谱段的中心波长为 λ 、谱段宽度为 $\Delta\lambda$,多光谱场景指 $\Delta\lambda/\lambda > 1/10$ 、细分谱段数目在数十个水平的场景,而高光谱场景是指 $1/100 > \Delta\lambda/\lambda > 1/1000$ 、细分谱段数目在数十到数百范围内的场景。

多模复合红外场景模拟技术所生成的红外场景包含所模拟目标及背景在不同波段的特征,这些波段涵盖紫外、可见光、短波红外、中波红外、长波红外、微波等。多模复合制导系统包含两种以上波段制导模式,例如中波/长波复合制导、射频/红外复合制导、射频/激光/红外复合制导等,前面介绍的各种红外场景生成器件(如电阻阵列、光热图像转换阵列、DMD、LCoS 等)都可以用来组成多模复合红外场景模拟器。在多模复合红外场景模拟技术中,除了红外图像生成技术,另一个非常关键的技术难点在于波长跨度较大的两个波段的目标模拟信息如何共口径复合输出。对于处于光学波段(如紫外、可见光、中波红外、长波红外)的多模复合场景模拟,一般可以通过设计复杂的复合光学系统实现多模场景共口径输出^[101-105]。但对于射频波段,典型的如射频/红外复合场景模拟器,需要设计专门的器件实现微波与光学波段的复合,目前国内北京理工大学提出的射频/红外波束合成器方案^[106-107]、哈尔滨工业大学提出的网纹镜方案等在射频/红外制导半实物仿真试验中得到了应用验证。

7 结 论

多谱段红外场景模拟技术为实验室内红外成像制导半实物仿真试验提供了模拟红外场景的手段。本文讨论的红外场景模拟装置有些已经在半实物仿真试验系统中使用,有些正在开发中。国外的 SBIR 公司开发的电阻阵列、TI 公司的 DMD 和特拉华大学的 LED 阵列已经应用于红外成像制导半实物仿真试验系统中。国内开发的基于电阻阵列、光热图像转换阵列、DMD 等器件的红外场景模拟技术也已经应用于红外成像制导半实物仿真试验系统中。

本文中讨论的各种技术提供红外场景生成方面都显示出一定的特点,能够满足目前红外成像制导半实物仿真试验的绝大多数功能。表 2 列出了典型红外场景生成技术方案的主要技术特征数据,在具体应用中

表 2 不同红外场景生成技术的主要技术特征数据

Table 2 Main featured technical parameters of different infrared scene generation technologies

Technology	Temperature range /K	Dynamic range /bit	Frame rate /Hz	Resolution / pixel	Spectrum range / μm	Scintillation	Non-uniform	Fill factor /%	Reference
Resistance array	285-700	16	200	1024×1024	3-5, 8-12	—	<1%	80	[9-11]
Photothermal image conversion array	220-580	8	200	2200×2200	3-5, 8-12	—	<1%	80	[37-38]
DMD	300-800	8	230-690	1280×1024	3-5	Yes	<0.02%	97	[42-43]
Infrared LED array	Max. 1800 or 1470	—	1000	512×512	3.2-4.2, 4.2-5.2	—	—	32 or 42	[72-73]

选用哪种方案时可以将其作为参考。例如,考虑需要一个高分辨率、温度范围不是很大、辐射谱为黑体谱、辐射波段包括中波和长波两个波段的场景模拟器,在这种情况下就可以选择基于光热图像转换阵列的场景模拟器;考虑需要一个温度范围大、温度高,而且对分辨率要求不高的情况下,可以选择基于电阻阵列的场景模拟器;在中波波段如果探测器积分时间足够长,能够与 DMD 调制时间相匹配,可以选择基于 DMD 的场景模拟器;如果考虑需要温度特别高,而且对辐射光谱没有要求,则可以选择基于 LED 阵列的场景模拟器。

参 考 文 献

- [1] 李卓, 李平. 动态红外图像生成技术综述[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S1): 283-294.
Li Z, Li P. Review of dynamic infrared scene projection technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(S1): 283-294.
- [2] 范永杰, 金伟其, 朱丽红. 红外场景辐射模拟技术发展[J]. 红外技术, 2013, 35(3): 133-138.
Fan Y J, Jin W Q, Zhu L H. Development of dynamic infrared scene projection technique[J]. Infrared Technology, 2013, 35(3): 133-138.
- [3] 李卓, 时庆峰, 王欣, 等. 低温红外场景生成技术研究[J]. 空天防御, 2020, 3(4): 1-7.
Li Z, Shi Q F, Wang X, et al. Research on low temperature infrared scene generation technology[J]. Air & Space Defense, 2020, 3(4): 1-7.
- [4] McHugh S, Franks G, LaVeigne J. High-temperature MIRAGE XL (LFRA) IRSP system development[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10178: 1017809.
- [5] Shin Y B, Kim W Y, Lee H C. Anodic aluminum oxide-based IR emitter for high-speed infrared scene projector[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2019, 28(6): 1032-1038.
- [6] Franks G, Laveigne J, Danielson T, et al. Development of an ultra-high temperature infrared scene projector at Santa Barbara Infrared Inc[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9452: 94520W.
- [7] 马斌, 程正喜, 翟厚明, 等. 国产电阻阵列技术的发展趋势[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2314-2322, 2327.
Ma B, Cheng Z X, Zhai H M, et al. Development of domestic resistive arrays technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(12): 2314-2322, 2327.
- [8] 杜惠杰, 赵宏鸣, 虞红, 等. 基于电阻阵列红外成像仿真中稀疏网格校正方法[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(1): 70-76.
Du H J, Zhao H M, Yu H, et al. Research on sparse grid non-uniformity correction technologies for infrared imaging resistor array[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(1): 70-76.
- [9] Tom D, Greg F, Nicholas H, et al. Achieving ultra-high temperatures with a resistive emitter array[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9820: 98200Z.
- [10] Sparkman K, LaVeigne J, McHugh S, et al. Ultrahigh-temperature emitter pixel development for scene projectors[J]. Proceedings of SPIE, 9071: 90711H.
- [11] Christopher J F, Seth C, Stephen T, et al. Test pixels for high-temperature infrared scene projection[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9452: 94520X.
- [12] Sparkman K, LaVeigne J, McHugh S, et al. Scalable emitter array development for infrared scene projector systems[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9071: 90711I.
- [13] Xu Y C, Chen J, Liao S Y. Development history and current situation of resistor array technology at home and abroad[M]. Dordrecht: Atlantis Press, 2022.
- [14] 赵松庆, 吴根水, 刘晓宁, 等. 256×256元 MOS 微电阻阵列动态场景生成装置[J]. 航空兵器, 2015, 22(6): 40-45.
Zhao S Q, Wu G S, Liu X N, et al. 256 × 256 unit element MOS minute resistance array dynamic scene producing device[J]. Aero Weaponry, 2015, 22(6): 40-45.
- [15] 张金城, 廖守亿, 张作宇, 等. 电阻阵列非均匀性校正实时性改进[J]. 红外技术, 2015, 37(11): 921-925.
Zhang J C, Liao S Y, Zhang Z Y, et al. Real-time improvement for resistor array nonuniformity correction[J]. Infrared Technology, 2015, 37(11): 921-925.
- [16] 张凯, 马斌, 黄勇, 等. 256 分辨率电阻阵性能测试及非线性校正方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 2921-2926.
Zhang K, Ma B, Huang Y, et al. Method of 256-resolution resistor array performance testing and non-linearity correction[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(11): 2921-2926.
- [17] Hao Y, Yang S H, Ling C, et al. Broadband visible to mid-infrared aluminum-black absorbers and the aging behavior[J]. Infrared Physics & Technology, 2021, 115: 103735.
- [18] 赵乾, 李卓, 王欣, 等. 周期性微结构对红外场景生成芯片空间分辨率的影响[J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1031001.
Zhao Q, Li Z, Wang X, et al. Spatial resolution of infrared scene projector chip with periodical microstructure[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1031001.
- [19] Bly V T. Passive visible to infrared transducer for dynamic infrared image simulation[J]. Proceedings of SPIE, 1980, 0226: 140-148.
- [20] Zhou L, Li Z, Li D F, et al. Large scale array visible-infrared converter based on free-standing flexible composites[C]//2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII, June 23-27, 2019, Berlin, Germany. New York: IEEE Press, 2019: 2527-2530.
- [21] Zhou L, Li Z, Li D F, et al. A soft composite thermal emitter with high efficiency in broadband infrared spectrum[C]//2019 Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS and MOEMS (DTIP), May 12-15, 2019, Paris, France. New York: IEEE Press, 2019.
- [22] Li D F, Zhang J Y, Shi Q F, et al. A robust infrared transducer of an ultra-large-scale array[J]. Sensors, 2020, 20(23): 6807.
- [23] Li D F, Zhang J Y, Shi Q F, et al. A robust infrared transducer beyond 2 K × 2 K pixels[C]//2021 IEEE 34th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), January 25-29, 2021, Gainesville, FL, USA. New York: IEEE Press, 2021: 923-926.
- [24] Zhang J Y, Li D F, Li Z, et al. A photothermal transducer based on 3D thermal management[C]//2021 21st International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers), June 20-24, 2021, Orlando, FL, USA. New York: IEEE Press, 2021: 601-604.
- [25] Li D F, Zhang J Y, Xu J S, et al. Ultra-large pixel array photothermal transducer and its thermal performance prediction strategy[C]//2023 IEEE 36th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), January 15-19, 2023, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2023: 1147-1150.
- [26] 赵乾, 李卓, 李德芳, 等. 薄膜面内微结构对热物性的调控研究[J]. 光学技术, 2020, 46(3): 301-309.
Zhao Q, Li Z, Li D F, et al. Tuning the thermophysical property of polyimide thin films by in-plane microstructure design [J]. Optical Technique, 2020, 46(3): 301-309.
- [27] 刘丹, 周朗, 王欣, 等. MEMS 红外图像转换芯片热力学性质研究[J]. 光学技术, 2019, 45(4): 502-508.
Liu D, Zhou L, Wang X, et al. The thermodynamic properties of the MEMS infrared transducer[J]. Optical Technique, 2019, 45(4): 502-508.
- [28] Li D F, Zhang J Y, Xu J S, et al. Single-step fabricated disordered pyramidal nanostructures for large-scale broadband visible light absorber with high-temperature stability[J]. Applied Surface Science, 2022, 601: 154279.
- [29] 周朗, 李卓, 石诺, 等. 基于 MEMS 技术的动态红外场景模拟

- 技术[J]. 空天防御, 2018, 1(1): 50-55.
- Zhou L, Li Z, Shi N, et al. Dynamic infrared scene simulation technology based on MEMS technology[J]. Air & Space Defense, 2018, 1(1): 50-55.
- [30] Zhou L, Li Z, Zhang J Y, et al. Thin layer broadband porous chromium black absorber fabricated through wet-etching process [J]. RSC Advances, 2019, 9(26): 14649-14656.
- [31] Zhou L, Wang X, Yang S H, et al. A self-suspended MEMS film convertor for dual-band infrared scene projection[J]. Infrared Physics & Technology, 2020, 105: 103231.
- [32] Zhou L, Wang X, Zhang J Y, et al. Self-suspended carbon nanotube/polyimide composite film with improved photothermal properties[J]. Journal of Applied Physics, 2020, 127(20): 205103.
- [33] Shi Q F, Gao Y Z, Li Z, et al. High-dynamic-range infrared radiometer based on chaos detection method[J]. Infrared Physics & Technology, 2021, 116: 103787.
- [34] Shi Q F, Gao Y Z, Zhang X, et al. Cryogenic background infrared scene generation method based on a light-driven blackbody micro cavity array[J]. Infrared Physics & Technology, 2021, 117: 103841.
- [35] 张思晨, 李卓, 高彦泽, 等. 低冷环境红外场景投影光学系统的设计[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1422003.
- Zhang S C, Li Z, Gao Y Z, et al. Design of optical system for infrared scene projection in cryogenic environment[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1422003.
- [36] 张晓乐, 李卓, 高彦泽, 等. MEMS 红外转换薄膜光驱动技术研究[J]. 光学学报, 2021, 41(15): 251-259.
- Zhang X L, Li Z, Gao Y Z, et al. Light-driven technology based on MEMS infrared conversion films[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(15): 251-259.
- [37] Zhang J Y, Li D F, Li Z, et al. Demonstration of thermal modulation using nanoscale and microscale structures for ultralarge pixel array photothermal transducers[J]. Microsystems & Nanoengineering, 2021, 7: 102.
- [38] Hao Y, Yang S H, Ling C, et al. Ultralarge pixel array photothermal film based on 3D self-suspended microbridge structure for infrared scene projection[J]. Small, 2023: 2208262.
- [39] Beasley D B, Bender M, Crosby J, et al. Advancements in the micromirror array projector technology II [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5785: 68-79.
- [40] 陈建华, 朱明, 黄德天. 数字微镜器件动态红外外场景投影技术 [J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(4): 325-336.
- Chen J H, Zhu M, Huang D T. Dynamic infrared scene projection technology based upon digital micromirror device[J]. Chinese Optics, 2010, 3(4): 325-336.
- [41] Zhang Y X, Wang Y P, Hou J Y. Circuit and optical system design for high frame rate DMD infrared scene simulation equipment[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(4): 404003.
- [42] Beasley D B, Bender M, Crosby J, et al. Dynamic infrared scene projectors based upon the DMD[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7210: 72100I.
- [43] Dupuis J R, Mansur D J, Vaillancourt R, et al. Two-band DMD-based infrared scene simulator[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7210: 72100J.
- [44] 庞广宁. 基于 DMD 的红外目标模拟系统关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- Pang G N. Key technology on DMD based infrared scene simulation[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.
- [45] 张宁. 基于 DMD 的大动态范围中波红外仿真系统研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2016.
- Zhang N. Research on large dynamic range infrared simulation system based on DMD[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [46] 潘越, 徐熙平, 乔杨. 双 DMD 红外双波段场景模拟器光机结构设计[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(12): 2994-3002.
- Pan Y, Xu X P, Qiao Y. Opto-mechanical structural design for two-DMD infrared dual-band scene simulator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(12): 2994-3002.
- [47] Pan Y, Xu X P, Qiao Y. Design of two-DMD based zoom MW and LW dual-band IRSP using pixel fusion[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 91: 90-100.
- [48] 顾航硕, 王凌云, 李光茜. 红外双波段景象模拟器光学系统设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2022, 45(3): 41-47.
- Gu H S, Wang L Y, Li G X. Optical design of MW/LW infrared dual-bands scene simulation system[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 45(3): 41-47.
- [49] Xie F, Zheng G F, Du B L, et al. Design and application of DMD-based infrared dynamic scene projector[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11455: 114558B.
- [50] 史梦飞. 红外目标模拟装置研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2022.
- Shi M F. Research on infrared target simulation device[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2022.
- [51] 许家林, 李丙玉, 刘阳, 等. 基于 DMD 的红外景象投射器灰度调制与同步技术[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1062-1067.
- Xu J L, Li B Y, Liu Y, et al. Gray scale modulation and synchronization of infrared scene projector based on DMD[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(4): 1062-1067.
- [52] 张凯, 黄勇, 孙力, 等. 动态红外场景仿真的灰度调制成像技术[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2283-2287.
- Zhang K, Huang Y, Sun L, et al. Dynamic infrared scene simulation using grayscale modulation imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(9): 2283-2287.
- [53] Han Q, Zhang J Z, Wang J A, et al. Diffraction analysis for DMD-based scene projectors in the long-wave infrared[J]. Applied Optics, 2016, 55(28): 8016-8021.
- [54] Ewing T, Buck J, Serati S, et al. Liquid crystal on silicon (LCOS) devices and their application to scene projection[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8356: 83560A.
- [55] Zhang Z C, You Z, Chu D P. Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(10): e213.
- [56] Ewing T, Folks W. Liquid crystal on silicon infrared scene projectors[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5785: 36-45.
- [57] Stockley J, Bauchert K, Linnenberger A, et al. Liquid crystal on silicon spatial light modulator for infrared scene generation[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7301: 73010H.
- [58] Jack R L, Kipp B. Testing a new generation 512×512 , >200 Hz capable, liquid crystal on silicon (LCOS) with ferro-electric liquid crystal, IR scene projector[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6208: 62080L.
- [59] Lippert J R, Wei H, Yu H P, et al. Record breaking high-apparent temperature capability of LCoS-based infrared scene projectors[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7663: 76630S.
- [60] 孙长俐. 硅基液晶空间光调制器及液晶滤波器的调制特性研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- Sun C L. Research on liquid crystal on silicon spatial light modulator and liquid crystal filter[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [61] Vitiello M S, Scalari G, Williams B, et al. Quantum cascade lasers: 20 years of challenges[J]. Optics Express, 2015, 23(4): 5167-5182.
- [62] Ricker R J, Provence S R, Norton D T, et al. Broadband mid-infrared superlattice light-emitting diodes[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121(18): 185701.
- [63] Meriggi L, Steer M J, Ding Y, et al. Development of mid-infrared light-emitting diodes for low-power optical gas sensors [C]//2015 11th Conference on Ph. D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME), June 29-July 2,

- 2015, Glasgow, UK. New York: IEEE Press, 2015: 180-183.
- [64] Abell J, Kim C S, Bewley W W, et al. Mid-infrared interband cascade light emitting devices with milliwatt output powers at room temperature[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(26): 261103.
- [65] Das N C. Performance comparison of top- and bottom-emitting long wave infrared light emitting diode devices[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2009, 38(11): 2329-2334.
- [66] Das N C, Olver K, Towner F. High emissive power MWIR LED array[J]. *Solid-State Electronics*, 2005, 49(8): 1422-1427.
- [67] Canedy C L, Bewley W W, Tomasulo S, et al. Interband cascade LEDs grown on silicon[C]//2022 IEEE Research and Applications of Photonics in Defense Conference (RAPID), September 12-14, 2022, Miramar Beach, FL, USA. New York: IEEE Press, 2022.
- [68] Barakhshan P. End to end testing and non-uniformity detection and correction of superlattice light emitting diodes infrared scene projectors[D]. Delaware: University of Delaware, 2020.
- [69] 李洁, 金文. 基于二极管阵列的动态红外场景生成新系统[J]. *光电子技术*, 2016, 36(1): 65-69.
Li J, Jin W. A new dynamic infrared scene generation system based on diode array[J]. *Optoelectronic Technology*, 2016, 36(1): 65-69.
- [70] Das N C, Kiamilev F, Prineas J P, et al. Performance of 64 × 64 MWIR super lattice light-emitting diode (SLED) array for IR scene generation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6942: 69420I.
- [71] Norton D T, Olesberg J T, McGee R T, et al. 512 × 512 individually addressable MWIR LED arrays based on type-II InAs/GaSb superlattices[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2013, 49(9): 753-759.
- [72] Russell J R, Sydney P, Lee M M, et al. 512 × 512 array of dual-color InAs/GaSb superlattice light-emitting diodes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10124: 101241L.
- [73] Ejzak G A, Dickason J, Marks J A, et al. 512 × 512, 100 Hz mid-wave infrared LED microdisplay system[J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(10): 1139-1144.
- [74] Ahmed H, Deputy A, Singh J, et al. Transitioning the worlds first 1K × 1K Infrared LED Scene Projector Systems from Research and Development (R&D) to Production Level[C]//2021 IEEE Research and Applications of Photonics in Defense Conference (RAPID), August 2-4, 2021, Miramar Beach, FL, USA. New York: IEEE Press, 2021.
- [75] Hernandez M, Marks J, Koerperick E, et al. Improving density and efficiency of infrared projectors[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(3): 7000910.
- [76] Browning T, Jackson C, Houser R, et al. A modular platform for rapid IRSP development[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(3): 7001010.
- [77] Ting D Z, Soibel A, Khoshakhlagh A, et al. InAs/InAsSb type-II strained layer superlattice barrier infrared detectors[C]//2019 IEEE Photonics Conference (IPC), September 29-October 3, 2019, San Antonio, TX, USA. New York: IEEE Press, 2019.
- [78] 吴良才, 宋志棠, 周夕淋, 等. 相变存储器材料研究[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46(10): 126-134.
Wu L C, Song Z T, Zhou X L, et al. Study of phase change materials for phase change random access memory[J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2016, 46(10): 126-134.
- [79] 汪成根, 张桂菊. 一种面向光通信的硫系相变薄膜材料[J]. *中国科技信息*, 2022(16): 133-136.
Wang C G, Zhang G J. Sulfur-based phase change thin film material for optical communication[J]. *China Science and Technology Information*, 2022(16): 133-136.
- [80] Ginn J, Warren A P, Shrekenhamer D, et al. Phase-change metamaterial infrared scene projector[C]//2022 IEEE Research and Applications of Photonics in Defense Conference (RAPID), September 12-14, 2022, Miramar Beach, FL, USA. New York: IEEE Press, 2022.
- [81] Malyutenko V K, Bogatyrenko V V, Malyutenko O Y. Bulk silicon as photonic dynamic infrared scene projector[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(13): 131109.
- [82] 赵宇洁, 高教波. 红外半导体下转换机理研究[J]. *激光与红外*, 2007, 37(8): 747-749, 755.
Zhao Y J, Gao J B. Light down-conversion mechanism of infrared semiconductor[J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(8): 747-749, 755.
- [83] Yi T, Wang S H, Li Y H, et al. Photoinduced opaque effect model for light down-converter of dynamic infrared scene projection[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(12): 127101.
- [84] Muhowski A J, Kamboj A, Briggs A F, et al. Cascaded InGaSb quantum dot mid-infrared LEDs[J]. *Journal of Applied Physics*, 2022, 131(4): 043105.
- [85] Yoon Y J, Biesold G, Liang S A, et al. Stable infrared-emitting chemical composition gradient quantum dots for down-convertors and photodetectors[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2020, 3(11): 11335-11343.
- [86] Kang Z T, Yoon Y J, James J C, et al. Quantum dots for multi-band infrared scene projector[C]//2018 IEEE Research and Applications of Photonics in Defense Conference (RAPID), August 22-24, 2018, Miramar Beach, FL, USA. New York: IEEE Press, 2018.
- [87] Rusche G. IR emitting CRT[J]. *Proceedings of SPIE*, 1987, 0765: 85-88.
- [88] Jin H S, Lin Y S, Wang S Y, et al. Performance and application analysis of 8- to 12- μm IR-CRT scene simulator[J]. *Physica: A-statistical Mechanics and Its Applications*, 2000, 4223: 169-172.
- [89] Qiao J W, Zhou G J, Zhou Y Y, et al. Divalent europium-doped near-infrared-emitting phosphor for light-emitting diodes [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 5267.
- [90] Liu S, Wang Z, Cai H, et al. Highly efficient near-infrared phosphor LaMgGa11O19: Cr³⁺[J]. *Inorganic Chemistry Frontiers*. 2020, 7(6): 1467-1473.
- [91] Menkara H, Kang Z T, James J C. IR scene projection by optical down-conversion[C]//2021 IEEE Research and Applications of Photonics in Defense Conference (RAPID), August 2-4, 2021, Miramar Beach, FL, USA. New York: IEEE Press, 2021.
- [92] Van L C, Van Le H, Nguyen N D, et al. Modeling of lead-bismuth gallate glass ultra-flatted normal dispersion photonic crystal fiber infiltrated with tetrachloroethylene for high coherence mid-infrared supercontinuum generation[J]. *Laser Physics*, 2022, 32(5): 055102.
- [93] Pakarzadeh H, Sharif V, Vigneswaran D, et al. Graphene-assisted tunable D-shaped photonic crystal fiber sensor in the visible and IR regions[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2022, 39(6): 1490-1496.
- [94] Han J, Wei C, Chi H, et al. Theoretical simulations of the soliton self-frequency shift of mid-infrared femtosecond pulses in step-index tellurite optical fibers: broadband tunability and high efficiency[J]. *OSA Continuum*, 2019, 2(6): 1851-1862.
- [95] 李仁玢, 郭昊, 乔宇, 等. 三维光子晶体红外隐身材料特性[J]. *兵工学报*, 2022, 43(8): 1892-1901.
Li R F, Guo J, Qiao Y, et al. Properties of three-dimensional photonic crystals as infrared stealth materials[J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(8): 1892-1901.
- [96] Wilson J, Burckel B, Caulfield J, et al. Photonic crystal scene projector development[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7663: 766309.
- [97] Wilson J, Burckel B, Caulfield J, et al. Development of photonic crystal based large format IR scene projection technology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8356: 835609.
- [98] 田义, 李奇, 张励, 等. 一维光子晶体红外空间光调制器的构想[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2333-2338.

- Tian Y, Li Q, Zhang L, et al. One-dimensional photonic crystal infrared space light modulator imagination[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2333-2338.
- [99] Yu H, Guo L, Wang S, et al. Application of LC and LCoS in multispectral polarized scene projector (MPSP)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10125: 1012519.
- [100] Linnenberger A, Masterson H, Rice J, et al. Liquid-crystal-based hyperspectral image projector[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7695: 76951Z.
- [101] Laveigne J, Franks G, Prewarski M. A two-color 1024×1024 dynamic infrared scene projection system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8707: 870703.
- [102] McHugh S, Franks G, LaVeigne J. High-temperature MIRAGE XL (LFRA) IRSP system development[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10178: 1017809.
- [103] Dupuis J R, Mansur D J, Vaillancourt R, et al. Two-band DMD-based infrared scene simulator[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7301: 73010E.
- [104] Dupuis J R, Mansur D. Contrast analysis for DMD-based IR scene projector[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8015: 801505.
- [105] 潘越, 徐熙平, 乔杨. 双 DMD 变焦红外双波段场景模拟器光学引擎设计[J]. *红外与毫米波学报*. 2018, 37(4): 437-444.
- Pan Y, Xu X P, Qiao Y. Design of optical engine for zoom infrared two-band scene simulator based on dual-DMD[J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2018, 37(4): 437-444.
- [106] Tian Y, Xu R, Shi R, et al. IR/MW multilayered dielectric plate beam combiner design, optimization, and evaluation[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(2): 288-297.
- [107] Tian Y, Lü L J, Jiang L W, et al. Infrared/microwave (IR/MW) micromirror array beam combiner design and analysis[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(22): 5411-5419.

Multi-Spectral Complex Infrared Scene Projection Technology

Li Zhuo, Gao Yanze*, Zhang Jinying**

School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract

Objective With the widespread application of infrared imaging guidance technology in various offensive and defensive precision guided weapons, infrared imaging guidance hardware-in-the-loop simulation technology has undergone rapid development. Missile flight tests in the laboratory can significantly reduce the outfield testing cost. This reflects the importance of developing hardware-in-the-loop simulation test systems for infrared imaging guidance. Infrared imaging scene projection technology is one of the key technologies in infrared imaging guidance of hardware-in-the-loop simulation technologies. Infrared scene projection systems are mainly employed to replicate various types of optical targets, backgrounds, and optical environment interference in different infrared bands. Nowadays, optical detection systems are complex, multi-spectral, and high-resolution with high frame rate, high dynamic range, and even scene-sensitive systems containing distance information. The main sensors include missile seeker, forward looking infrared system (FLIR), target tracking device, and automatic target recognition device. Although infrared scene projection technology has made significant progress in recent years, the current infrared scene projection technology still cannot meet the performance requirements of testing these complex optical detection systems. It is necessary to study complex infrared scene projection systems for different optical detection applications.

Methods Multi-spectral complex infrared scene projection technology is the key technology to infrared imaging guidance of hardware-in-the-loop simulation system technology, and its technical characteristics limit the overall performance of the entire simulation system. The technical approaches to multi-spectral complex infrared scene projection mainly include resistor array, photothermal image conversion array, digital micro-mirror device (DMD), liquid crystal spatial light modulator, infrared LED array, phase change material array, tunable emissivity semiconductor screen, quantum dot down-conversion chip, photoluminescent phosphor material, and photonic crystal. We review the development history of multi-spectral complex infrared scene projection technology, introduce the implementation principles of typical technologies, discuss the relative advantages and disadvantages of each technology, and summarize the research of major research institutions at home and abroad. Finally, the performance parameters of these technologies are compared.

Results and Discussion According to the mechanism of infrared scene projection, the current infrared scene projection systems are divided into two categories of radiation type and modulation type. Radiation type includes resistor array and photothermal image conversion array. Modulation type includes DMD and liquid crystal spatial light modulator. Other infrared scene projection technologies are also introduced, such as infrared LED array, phase change material array, tunable emissivity semiconductor screen, quantum dot down-conversion chip, photoluminescent phosphor material, and photonic crystal. Resistor array and photothermal image conversion array can provide both mid-infrared and long-infrared scenes. DMD and infrared LED arrays can only generate mid-infrared scenes, but they achieve a frame rate beyond

200 Hz.

Conclusions Some of the infrared scene projection devices discussed in this paper have been employed in hardware-in-the-loop simulation test systems, and some are under development. Resistor arrays of the SBIR company, DMD of TI company, and the infrared LED array from the University of Delaware have been applied in hardware-in-the-loop simulation test systems. The technologies developed domestically based on resistor arrays, photothermal image conversion arrays, DMD, and other devices have also been adopted in hardware-in-the-loop simulation test systems for testing infrared systems. The various technologies discussed in this paper have shown their characteristics, which can provide most of the functions in current optical guidance hardware-in-the-loop simulation experiments. This study can serve as a reference during selecting solutions for specific applications to detect infrared systems.

Key words imaging system; infrared; multi-spectral band; complex infrared scene projection; hardware-in-the-loop simulation test