文章编号：1001-9014(2026)01-0001-15

DOI：10. 11972/j. issn. 1001-9014. 2026. 01. 001

第四代红外探测器的定义与发展探析

叶振华[1,2*]，李辉豪[1,2*]，刘 铭[1,3]，赵 俊[1,4]，林 春[1,2]，陈建新[1,2]

（1. 红外探测全国重点实验室，上海 200083；
2. 中国科学院上海技术物理研究所，上海 200083；
3. 中国电子科技集团公司第十一研究所，北京 100015；
4. 昆明物理研究所，云南 昆明 650221）

摘要：随着在航天侦察、光电对抗、空间科学等领域的广泛应用，红外探测器正经历从“第三代充分发展”向“第四代探索”的关键转型。面向当前红外探测技术应用的迫切需求，重点探析第四代红外探测器的定义与发展。首先，梳理红外探测器的发展脉络，从功能集成、学科发展、技术演进等方面探讨红外探测器的发展趋势，提出第四代红外探测器的初步定义。其次，论述第四代红外探测器在挑战光强探测极限性能、光场多维信息感知、片上智能化和红外微系统芯片等技术发展的简要思考。最后，展望AI赋能下的红外探测器智能制造生态，加速第四代红外探测器由构想阶段迈向实际应用。

关 键 词：第四代红外探测器；极限性能；多维信息感知；片上智能化；红外微系统芯片；极致智能

中图分类号：O47　　**文献标识码：**A

Analysis of definition and development of the fourth generation infrared detector

YE Zhen-Hua[1,2*]，LI Hui-Hao[1,2*]，LIU Ming[1,3]，ZHAO Jun[1,4]，LIN Chun[1,2]，CHEN Jian-Xin[1,2]

（1. National Key Laboratory of Infrared Detection Technologies，Shanghai 200083，China；
2. Shanghai Institute of Technical Physics，Chinese Academy of Sciences，Shanghai 200083，China；
3. The 11th Research Institute of CETC，Beijing 100015，China；
4. Kunming Institute of Physics，Kunming 650223，China）

Abstract：Infrared detector has been widely applied in aerospace reconnaissance，electro-optical countermeasures，and space science. Currently，it is undergoing a critical transition from the "full development of the third generation" to the "exploration of the fourth generation. " Based on the pressing demands of current infrared detection applications，the preliminary definition and development considerations of the fourth-generation infrared detector was discussed. First，the developmental trajectory of infrared detectors was outlined. The evolution trend of the fourth-generation infrared detectors was explored from the perspectives of function integration，disciplinary advancement，and technology progression，and an initial definition for fourth-generation infrared detectors was proposed. Secondly，the preliminary contemplation on pivotal technological advancements for fourth-generation infrared detectors，encompassing the exploration of extreme detection performance，multidimensional light field information sensing，on-chip intelligence，and infrared microsystem chips，was delineated. Finally，an intelligent manufacturing ecosystem for infrared detectors was envisaged，which facilitates the transition of fourth-generation infrared detectors from conceptualization to practical application.

Key words：Fourth-generation infrared detectors，extreme detection performance，multi-dimensional information sensing，on-chip intelligence，infrared microsystem chips，extreme intelligence

引言

红外探测技术具有“全天时、抗干扰、被动感知”等独特优势，是高效获取目标信息不可替代的核心手段，已成为现代信息体系的战略性支柱。红外探测器是一个高度集成的光电部件，是红外光电

收稿日期：2025-12-24，**修回日期：**2025-12-26　　**Received date**：2025-12-24，**Revised date**：2025-12-26

基金项目：国防科技战略先导计划项目（25-ZLXD-01-02-17-027）

Foundation item：Supported by Defense Science and Technology Strategic Pioneering Program Project（25-ZLXD-01-02-17-027）

作者简介（Biography）：叶振华（1977-），男，江西玉山人，二级研究员、博士，从事制冷型红外光电探测器研究。E-mail：zhye@mail. sitp. ac. cn

[*] **通讯作者**（Corresponding author）：E-mail：zhye@mail. sitp. ac. cn，lihuihao20@mails. ucas. ac. cn

探测系统的核心。随着第三代红外探测器逐渐成熟、进入应用，红外探测技术开始进入多元化发展的新格局，新概念、新技术快速涌现，但国内外对第四代红外探测器定义及未来技术发展方向尚未形成共识[1-9]。

长期以来，红外探测的重心是测量目标发射或反射的红外辐射强度（光强）。这一单一维度信息虽然能有效揭示目标的存在、轮廓和温度分布，但其局限性也日益凸显。首先，信息高度压缩与丢失：光强仅仅是光场全部信息的一个标量投影，光的偏振态所携带的表面材质与粗糙度信息、光谱特征所对应的物质分子“指纹”、相位分布所蕴含的微观形貌与三维结构信息，在强度成像过程中被完全忽略[10-12]。其次，识别能力本质受限：仅凭灰度或伪彩色图像，难以区分光谱响应相似但材质迥异的目标，导致高虚警率。最后，环境适应性弱：光强信号极易受大气散射、背景杂波等干扰，在复杂气象条件下或针对低对比度、伪装目标时，探测性能急剧下降。这些局限性，亟需发展光场信息更全面感知的红外芯片。

同时，从海湾战争、伊拉克战争到俄乌冲突、印巴冲突，现代信息化战争从单体机械对抗向智能化集群对抗的形式升级，集群行为潜在威胁持续上升。水下、地下、海上、空天等多域威胁成为主流模式，冲击传统安全体系。大国博弈加剧，美国已提出“金穹”计划，利用先进红外探测系统实现威胁目标的发现、识别与跟踪，要求红外探测器向更高性能、更密集组网和更智能处理的方向发展。为实现异常信号早期预判，需求红外探测器具备目标自适应探测与可重构反演能力，在极端事件发生前即实现预判与决策。

当前，红外探测器发展存在多代并存的态势。高分辨率、高灵敏度的第三代红外探测器仍是当前红外探测系统应用的主流，以其较高的技术成熟度为第四代红外探测器发展提供研究基础。同时，多维感知、片上智能化等新概念、新技术也在推动构建第四代红外探测器的全新技术范式。本文拟通过介绍红外探测应用的迫切需求，梳理红外探测器的发展脉络，从功能集成、学科发展、技术演进等方面共同定义第四代红外探测器内涵，给出红外探测器的主要发展方向和未来趋势的思考，并展望人工智能（AI）赋能红外探测器智能制造生态。

1 第四代红外探测器的定义探析

1.1 红外探测器的发展脉络

如图1所示，伴随着半导体芯片技术的进步和红外探测应用需求的更迭，红外探测器的发展经历了多次更新换代。

第一代 & 第二代：主要解决了从单元、线列探测器向扫描型和凝视型焦平面阵列的跨越，在性能指标上主要关注线列/焦平面阵列像元规模的提升，是技术的基础和普及阶段。

第三代：是目前已大规模进入装备的主流技术，在进一步扩大探测器规模的同时，出现了双色/多色、数字化、甚长波、高工作温度等“超越规模”的发展方向，其核心是追求在尺寸、重量、功耗、性能和价格（SWaP³）之间取得最佳平衡，强调战术装备的泛在化应用能力。更高性能的“高端三代”则在

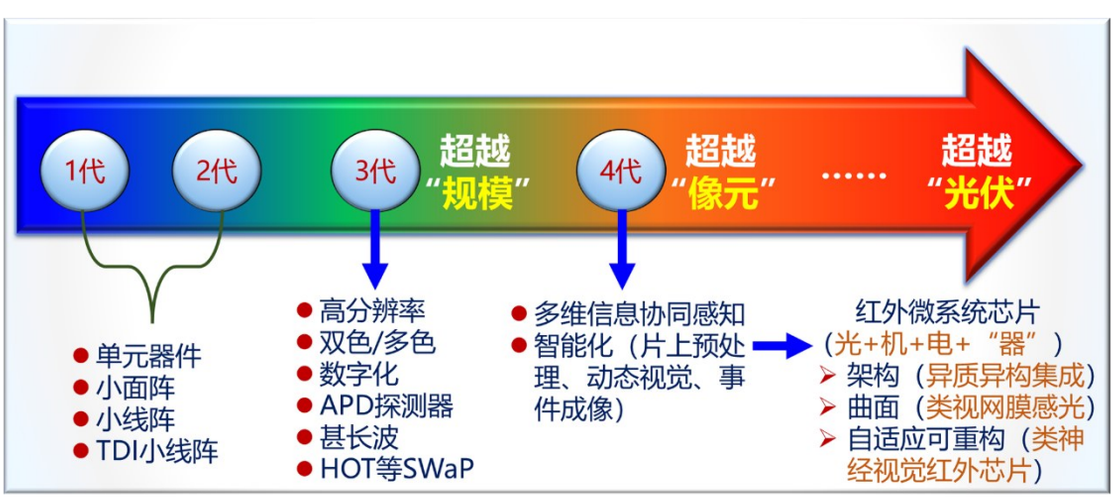

图1 红外探测器的发展脉络[1]

Fig. 1 Development trajectory of infrared detector[1]

向超高分辨率等极限性能挑战,其核心指标主要体现在空间、时间、能量、光谱等分辨率的进一步提升。

第四代红外探测器是正在发展的前沿方向,其核心特征是通过集成人工微结构、智能处理电路,实现“超越像元”的发展,从传统的光强信号探测,向涵盖偏振、光谱、相位等维度的光场多维信息融合感知演进,标志着先进光电探测技术的内涵发生了根本性变革。这一跨越的核心,是将探测器从记录目标辐射能量强弱的“能量积分器”,升级为能够解译光波本身携带的丰富物理与化学信息的“信息解译器”,从而直接服务于目标的特性识别与智能认知,代表了从“看得见”到“看得懂”的跨越,其核心指标正从传统的响应率、噪声与分辨率等物理参数,转变为红外探测器在多维信息融合、精确识别、实时处理与智能分析方面的综合性能。

随着集成化、智能化趋势的深入推进,红外探测技术的发展已从追求单一光电转换性能的极致,迈向多功能模块协同集成的“系统级”创新,催生了光、机、电、器一体化集成为主要特征的“红外微系统芯片”概念,其本质是实现从单一探测器器件向具备智能感知、边缘计算与自主认知能力的红外光电微系统的质变,建立自主智能红外感知体系。

1.2　第四代红外探测器的定义与架构

第四代红外探测器初步定义是继高性能第三代探测器之后,面向未来智能化、信息化需求所提出的新一代技术范式。其核心特征是从传统单一的“强度探测”向“多维信息感知与智能处理”的根本性跨越,标志着技术从“器件”向“系统”、从“数据收集”向“信息生成”的深刻转变,其重要意义不仅在于提升探测精度与感知维度,更在于为红外探测技术从“性能驱动”向“智能驱动”转变奠定了基础。

如图2所示,第四代红外探测器的物理架构为:在高性能三代红外探测器的基础上,光敏感芯片集成多维信息光场调控、读出电路片上集成图像预处理和智能处理算法。通过多体系新材料、超密超敏新器件、全光多维感知新方法、片上智能处理新范式、可拓展模块化新架构等核心技术的突破,实现更全信息获取、更智能信息感知、更低系统资源消耗、自适应可拓展模块化。

1.3　第四代红外探测器的发展根基

如图3所示,第四代红外探测器发展的根基主要为极限性能和极致智能。

(1)极限性能

(a)高端三代红外探测器。近年来,随着半导体芯片技术的发展,以超高分辨率、超高灵敏度、超快响应等为技术特征的高端第三代红外光电探测器件在国内外获得了重大的技术突破。红外探测器在空间特性、能量特性、时间特性、光谱特性等方面的分辨率不断提升,逐渐趋近于由材料本征属性、噪声机制与量子极限所约束的理论性能边界。

(b)光场信息多维感知。具备前沿性与颠覆性潜力的下一代探测技术,往往引入精细化的光场调控机制(如超构表面、光谱滤波、偏振选择等),通过主动筛选具备特定波长、角度、偏振或相位信息的信号光,进一步限制了到达探测器敏感区域的光通量。

在实现高空间、时间、能量和光谱分辨率极限性能,以及光场多维信息感知,均客观上削弱了像元层面可利用的光信号强度,从而对探测器的综合灵敏度、低噪声读出电路以及后续信号处理算法提出了严峻的挑战。因此,如何在实现多维度高分辨

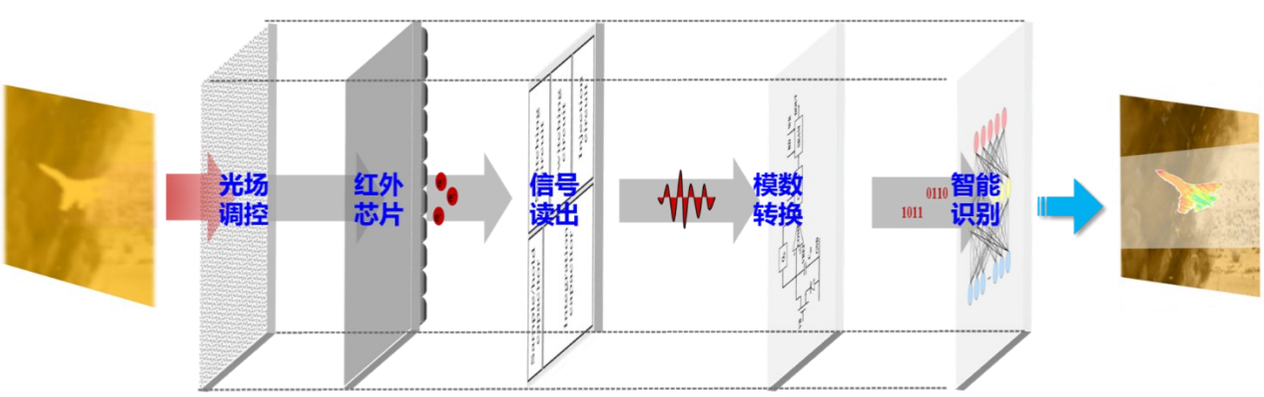

图2　第四代红外探测器物理架构

Fig. 2　Physical architecture of the fourth-generation infrared detector

率探测的同时保持乃至提升系统灵敏度，是第四代红外探测器亟待攻克的关键科学问题与技术瓶颈。

(2)极致智能。

(a)片上智能化。第四代红外探测器的发展标志着红外技术从单一感知向智能感知的根本性转变。其特征不仅体现在传统性能参数的提升，更在于与人工智能技术的深度融合。从技术内涵来看，片上智能化意味着将部分或全部信号处理、特征提取乃至初步决策算法集成于探测器焦平面阵列之中，使其具备在信息源头进行实时分析和筛选的能力。这极大缓解了后端系统的数据吞吐与处理压力，显著提升了系统响应速度与能效。

(b)AI赋能红外探测器“智造”。智能制造则贯穿于探测器设计、材料生长、芯片加工、封装测试的全链条，通过引入机器学习、数字孪生、智能管控等极致智能 手段，实现对复杂工艺的优化、生产一致性的提升以及成品率的突破。

人工智能在算法、算力及数据层面的持续进步，将成为推动第四代红外探测器研发与应用的重要基础。

1.4 第四代红外探测器的体系性

如图4所示，从功能节点的角度而言，第四代红外探测器将形成覆盖“光管理”、“电调控”、“预处理”、“智能化”的一体化功能闭环，实现从“信号流”到“信息流”的跨越。

(1)光管理。核心功能节点始于芯片层面的主动光场管理。通过在芯片像元结构上集成亚波长尺度的人工微结构(如超构光栅、介电谐振腔等)，实现对入射光的波前调控，在光电转换前即完成对光谱、偏振及角动量等多维信息的选择性增强与结构化编码，为后续环节提供了特征强化的光电信号。

(2)电调控。经光管理结构调制的入射光被红外光敏感芯片转换为光电信号，进入电学调控阶段。该环节的核心是信号特征保持的红外光敏感芯片像元结构和读出电路设计。不仅需实现高保真、大动态范围的信号转换与传输，更需通过多通道、可配置的模拟前端架构，确保偏振、光谱等特征信息以差异化电信号形式得以无损传递与初步关联，为信息融合提供物理载体。

(3)预处理。在模拟及数模混合域进行的图像信号预处理构成了承上启下的关键节点。其功能在于对并行输出的光电信号实施片上实时处理，包括时-空域背景抑制、特征参量的模拟计算以及基于规则的数据稀疏化，在信号数字化前完成数据压缩与特征降维，有效滤除冗余，从而缓解后续数字处理模块在数据吞吐与功耗方面的瓶颈难题。

(4)智能化。片上智能信息生成是技术链条的终端与价值实现环节。图像信号的专用处理单元采用感-存-算一体或神经形态计算架构，对经预处理的结构化数据进行运算。通过执行嵌入式的轻量化深度学习算法，完成目标检测、分类识别乃至行为分析等高层语义理解任务。至此，原始的光物理信号被逐级提炼、转化为具有明确语义的抽象信

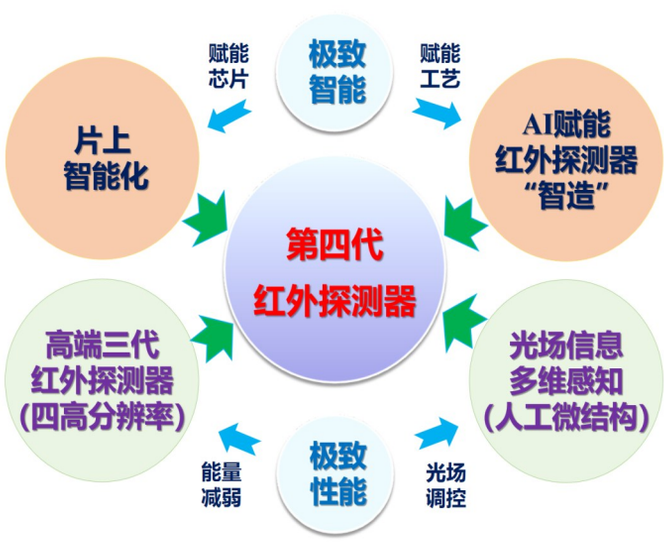

图3 第四代红外探测器发展根基

Fig. 3 Development foundation of the fourth-generation infrared detector

息输出。

因此,第四代红外探测器的功能节点是一个高度协同、闭环优化的片上信息处理系统,将传统分离的光学调控、模拟读出、数字处理等多个独立技术模块,通过跨层级协同设计(从材料、结构到电路与算法)与2.5D或3D异质集成技术,深度融合为单一芯片上的连续处理流,使探测器从被动的“数据采集器”演进为主动的“信息感知终端”,最终实现红外探测系统在效能、实时性与智能化水平上的飞跃。

1.5　第四代红外探测器的必然性

如图5所示,从学科发展的角度而言,微电子、光电子、人工智能和微纳光子学已形成综合交叉的趋势,可见光探测技术向红外波段拓展、AI赋能智能智造等多要素驱动第四代红外探测器的出现。

微纳光子学促使红外探测器从仅被动接受入射光的终端,发展为可主动调控光场属性的起点,通过设计亚波长尺度的人工微结构,实现相位、振幅、偏振、光谱等多维度信息在芯片层面的精确调控,实现了光学系统“芯片化”。同时,人工智能驱动信息处理从后端服务器前移至探测器感知前沿,催生了“感存算一体”的新架构,探测器具备即时特征提取、事件判断与数据压缩的能力,其输出从原始数据流升级为经过初步认知的“有效信息”,从而极大地提升了系统的感知效率与能效比。而三维异质集成技术则将传感、计算、存储等不同工艺、不同功能的芯片层垂直互联,实现了系统级性能的指数级提升与尺寸功耗的显著下降。因此,从学科发展视角看,第四代红外探测器的内涵是一个由多学科共同定义的“片上智能光电系统”,其学科边界是模糊且动态扩展的。

1.6　第四代红外探测器的颠覆性

从技术演进的角度而言,第三代及其之前红外探测器的技术发展,主要关注“看得清、看得远、看

图4　第四代红外探测器的技术体系性

Fig. 4　Technical systematicness of the fourth-generation infrared detector

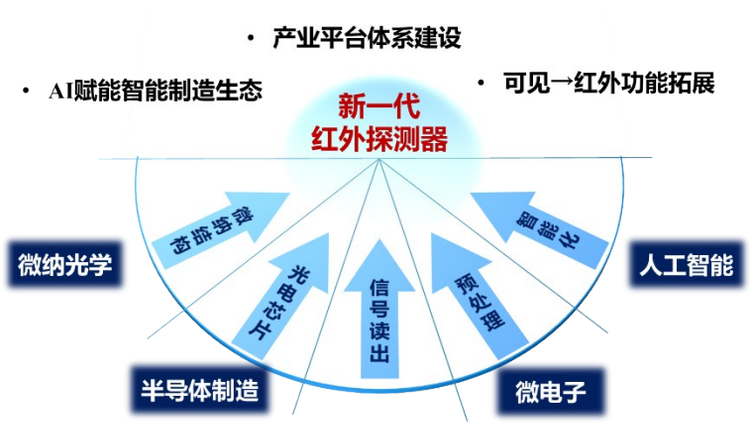

图5　第四代红外探测器的发展必然性

Fig. 5　Development inevitability of the fourth-generation infrared detector

得细”，核心指标是不断提升探测灵敏度、空间分辨率、时间分辨率等物理性能，其范式可归纳为“高性能成像”。然而，面对复杂场景中伪装识别、动态目标实时理解、海量数据实时处理等新兴需求，仅凭提升物理参数已难以为继。

第四代红外探测器在此背景下实现范式突破，其核心内涵是从“成像探测器”向“感知传感器”的质变。首先，在信息探测层面，从单一的强度成像，演进为对目标光场的多维信息融合感知，为在复杂环境下洞察目标本质属性提供了前所未有的数据基础。其次，在系统架构层面，利用可集成的人工微纳结构替代了复杂庞大的光学系统，实现光学/探测器系统的芯片化。最后，在数据处理层面，其核心特征体现为“片上智能”。通过将AI算法与硬件深度融合，探测器本身具备了实时处理与分析多维信息的能力。不仅大幅降低了后端处理的数据负荷和系统延迟，而且实现了基于事件的、稀疏的、主动的感知模式，摒弃了传统帧扫描模式下大量的冗余静态数据，从而在功耗降低数个数量级的同时，获得了极高的时间分辨率与动态范围。

如图6所示，第四代红外探测器是从追求“物理参数极限”到追求“信息维度与认知智能”的战略性跨越，在颠覆光强探测极限的基础上，进一步颠覆光学系统极限和数据处理极限，实现从光强向多维信息融合探测发展、从光学系统-探测器向芯片化集成演进、从海量信息被动探测到自适应自主探测变革。

2 光场多维信息感知红外芯片

如图7所示，传统红外探测器主要依赖光强信息进行成像，入射光的相位、偏振、波长等多维信息均被舍弃，限制了后端数据处理的空间。然而在面对目标伪装识别、复杂背景区分和恶劣环境适应等挑战时，单一强度信号已无法满足复杂场景红外探测的难题，前沿研究正致力于从多个独立且互补的维度拓展红外探测的能力边界。

在多维信息感知的应用实现上，当前主要存在三种技术路线：

(1)分孔径/分振幅系统：通过光学分束器将入射光分成多路，每路通过滤光片实现特定信息的探测。该技术路线应用较早、成熟度高，但系统体积大、光能利用率低，且多路信息需要精确配准。

(2)分焦平面系统：在焦平面阵列上集成针对不同维度信息的微结构滤波器，实现空间上的多维度信息编码。例如，通过在每个像元或像元组上制作不同特性的滤光片或偏振片，实现多光谱或偏振信息的获取。这种方法集成度高，但空间分辨率有所牺牲。

(3)计算感知系统：通过编码孔径、压缩感知等计算光学方法，在单次曝光中获取混合的多维信息，再通过算法重构各维度信息[13-15]。这种方法是当前研究的热点，有望实现高维信息的高效获取。

第四代红外探测器主要采用分焦平面系统和计算感知系统，通过在红外光敏感芯片衬底背侧集成亚波长微纳结构，选择性获取含有不同信息特征的入射光，实现多波段、多维度信息的时空融合，使红外探测器能够获取目标强度、光谱、偏振等多维光学信息，显著提升了目标识别、环境适应和信息获取能力。

图6 第四代红外探测器的发展颠覆性

Fig. 6 Disruptive development of the fourth-generation infrared detector

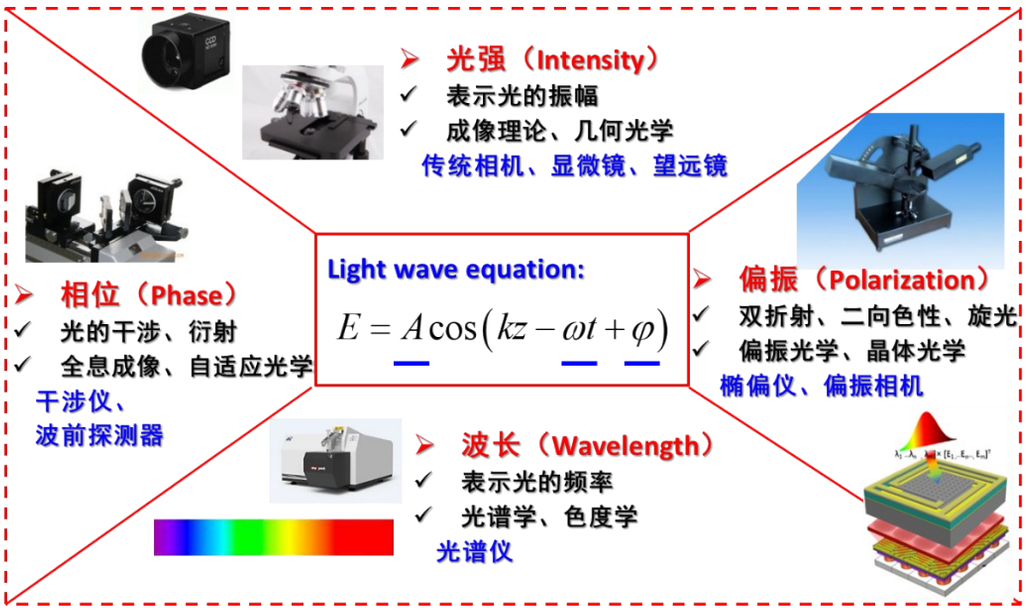

图 7　光场多维信息感知红外芯片

Fig. 7　Light field multi-dimensional information perception infrared detector

2.1　光谱选择红外探测器

光谱维度是红外探测中信息含量最为丰富的维度之一，不同原子或分子在红外波段具有独特且稳定的吸收或发射谱线，光谱感知能力的提升直接决定了探测器的物质识别和化学分析能力。中波红外和长波红外大气窗口，覆盖了众多气体分子和有机化合物的特征谱峰，使红外光谱探测在环境监测、工业过程分析、医疗诊断等领域不可或缺。

红外光谱感知的技术途径主要包括前置可调谐滤光片[16-17]、基于干涉原理的傅里叶变换光谱[18]，以及新兴的片上集成超构光谱仪[19-21]。最新突破性进展体现在多维度信息融合器件的出现，例如，我国科学家利用超构表面实现了对多个离散波长的独立、任意偏振态调控，创造性地将光谱选择与偏振解析集成于单一器件，为发展极其紧凑的高光谱-全偏振成像系统奠定了物理基础[22]。

2.2　偏振感知红外探测器

偏振是描述光波矢量振动方向特性的物理量，对目标表面物理特性具有极端敏感性。当光与物质相互作用时，其偏振态会随表面材质、粗糙度、入射角等发生可预测的改变。因此，偏振信息能够穿透烟雾、尘埃，有效抑制背景干扰，凸显人造目标（通常具有规则表面和较强偏振效应）与自然背景的差异，对于提高目标与背景的对比度、识别人工目标和自然物体具有重要意义。

传统偏振探测主要通过在探测器前旋转偏振片或使用分振幅偏振系统实现，但这些方法存在体积大、效率低、动态范围有限等问题。近年来，分焦平面偏振技术（DoFP）成为发展主流，通过在探测器像元上直接集成亚波长金属光栅或超构表面等微纳光学结构，实现芯片级的小型化、阵列化偏振滤光[23]。偏振感知的一个新兴方向是全斯托克斯偏振测量，即同时测量光波的四个斯托克斯参数，从而完全表征其偏振状态。传统方法需要至少四次测量，而基于超表面的紧凑型全斯托克斯偏振仪正在兴起。通过设计具有空间变化光学响应的超表面，可以实现单次曝光的全偏振信息获取[24]。我国科研机构在此领域取得了显著进展，例如已成功研制出基于碲镉汞和Ⅱ类超晶格的偏振焦平面探测器，并将其应用于海上舰船探测、地面伪装识别等，显著提升了复杂环境下的目标检出率[25-26]。

2.3　相位解析红外探测器

相位和光程信息反映了光波传播过程中的波前变化和时间延迟，是获取目标三维形貌、微位移和振动特征的关键。光波的相位分布直接编码了其传播路径上的光程差信息，因此通过干涉等手段恢复相位，可以精确反演出目标表面的微观起伏、三维形貌乃至内部折射率分布，分辨率可突破衍射极限。这对于精密光学加工检测、生物活体细胞观测、合成孔径雷达成像等应用至关重要。

在红外波段，相位测量面临波长较长、相位解调困难等挑战，但近年来基于外差探测、相干探测

和数字全息的技术进步，为红外相位测量提供了可行方案[27-28]。红外数字全息通过记录干涉图样并数值重建，可获得目标的三维形貌和折射率分布；而夏克-哈特曼波前传感器则通过测量子孔径内的波前斜率，重构完整波前信息[29]。这两类技术在红外波段的应用，为光学检测、自适应光学和非破坏性检测提供了新工具。例如，我国研究团队发展的中红外螺旋相位成像技术，以及基于非线性上转换的单像素计算成像技术，实现了在室温下对极弱中红外信号的超灵敏探测和相位信息恢复，展示了在低信噪比条件下实现高精度相位感知的可行路径[30-31]。

2.4 光场信息感知的未来憧憬

将光强、偏振、光谱、相位乃至更多维度（如相干性、轨道角动量）的信息进行同步、协同感知与融合，是红外探测技术发展的必然趋势和终极憧憬。这并非简单的功能叠加，而是一场系统性的感知范式革命。

未来的憧憬蓝图将分层次展开：在器件层面，基于超构光子学等前沿领域，有望诞生一种“智能感知元”。该器件能在单个像元尺度上，通过精心设计的微纳结构对入射光场进行多维度解耦与调制，并可能集成初步的非线性处理或存算单元，实现“光-电-特征”的直接转换[32]。在信息层面，通过先进的人工智能算法，对实时获取的多维光场大数据进行融合解译[33]，系统将不再输出原始的图像帧，而是直接生成结构化的语义描述，例如：“区域A存在一个温度高于背景30K的目标，其表面偏振特性表明其为光滑金属，短波红外光谱特征与铝合金匹配，相位轮廓显示其为圆柱体。”在应用层面，这种能力将彻底改变众多领域：在自动驾驶中，车辆能同时“感知”路面材质（偏振）、识别远处行人热特征（光强/光谱）、并透过雨雾评估障碍物精确形状（相位）；在空间探测中，一个载荷即可同步完成行星表面成分分析、地形测绘与物理状态诊断。

当然，实现这一憧憬仍面临集成工艺、信息解耦算法、系统功耗与成本等系列挑战。然而，从光强到光场的跨越方向已无比清晰。它意味着红外探测器最终将进化成为模仿甚至超越生物视觉的“光电之眼”，不仅接收光子，更能理解光子所讲述的关于物质世界的完整故事，为真正的机器智能与自主系统提供不可或缺的感知基石。

3 片上智能化红外芯片

如图8所示，红外探测器正经历从“图像识别”向“特性识别”的范式跨越，其本质驱动力在于器件架构发生了根本性变革。探测器不再仅仅是传统成像系统中被动捕获光信号的“眼睛”，而是演进为能在感知源头实现信息预处理与特征提取的“智能前端”。传统红外探测系统采用“传感-传输-计算”的分离式架构面临严峻挑战，高精度红外图像传输造成的数据带宽压力显著制约系统可扩展性，片外处理芯片引入的延迟难以满足实时性需求，芯片间数据搬运引发能效瓶颈，这些难题增加了系统复杂性，导致红外探测系统的图像处理能力受到限制。

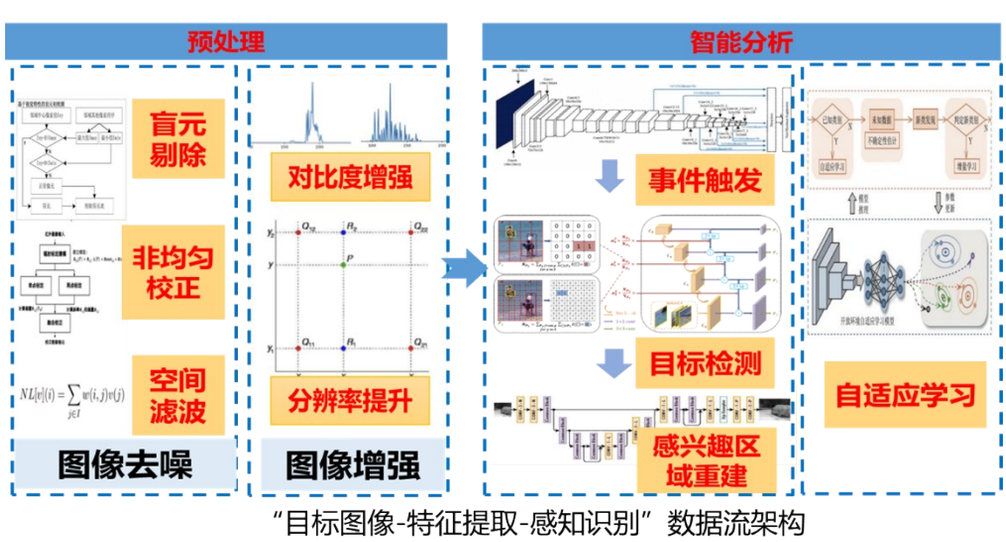

图8 片上智能化红外芯片

Fig. 8 On-chip intelligent infrared detector

3.1　片上图像预处理

由于材料生长、工艺制造及读出电路本身的限制,红外探测器原始输出信号中存在诸如盲元、固定图案噪声、随机噪声及空间频率缺陷等问题。为获取高质量图像,红外探测器逐渐片上集成了盲元检测与替代、非均匀性校正、空间滤波等图像预处理技术,构成了从修复像元缺陷、消除系统固定噪声到抑制随机噪声的递进处理链条。

预处理技术的发展始终与红外探测器材料、集成电路工艺及系统应用需求紧密联动。早期受限于计算资源,技术路径以依赖外部定标的静态、线性化处理为主导(如两点校正、邻域插值),其优势在于确定性与易实现性,但牺牲了自适应能力。随着应用场景复杂化(如长时间值守、极端温度变化)和硬件算力的提升,研究焦点转向了基于场景统计的自适应、非线性处理方法[34-37]。这一转变旨在解决参数漂移的“顽疾”,其核心矛盾从“精度”与“成本”的权衡,转变为“自适应能力”与“鬼影/拖尾副作用”之间的博弈。

目前,成熟的两点校正、阈值法盲元检测及线性滤波已在各类读出电路和前端处理器中广泛实现。而更先进的自适应与智能算法,正随着集成电路工艺的进步和智能计算架构的创新,逐步从后端向前端迁移。

3.2　片上集成智能化

随着人工智能的快速发展,“智能化红外探测器”应运而生,并成为红外技术发展的必然趋势。其核心理念是将信息处理能力前移,通过在传感器芯片层面集成传感单元、存储单元与微型处理单元,将感知、存储、计算三大功能融为一体,在数据产生的源头或近端完成特征提取、目标识别、事件检测等高级信息处理任务,仅输出结构化的语义信息或决策结果。这不仅是简单的“探测器+处理器”,而是通过芯片级、算法级、系统级的协同设计与深度融合,实现从“看见”到“看懂”的本质跨越。

在信息处理上,传统架构遵循“采集-传输-处理”的串行模式。海量的原始像素数据必须完整地传输至后端处理器(如中央处理器(CPU)、图形处理器(GPU)),才能进行特征提取与识别分析,导致数据带宽压力巨大、处理延迟显著。新型架构则实现了“在传感中处理”。它借鉴生物视觉系统的并行、异步处理机制,在探测器阵列内部或紧邻的读出电路中,直接对信号进行时空滤波、事件检测、对比度增强甚至简单的模式匹配[38-40]。这种前端并行处理方式,仅将有意义的事件或抽象后的特征向量向后传输,输出内容实现从“原始数据流”到“特征信息流”的升级。

在系统架构上,传统路径主要通过提升分辨率、灵敏度和帧频来优化性能,但这往往以更高的功耗、更大的数据量和更复杂的后端系统为代价。新型智能前端架构则通过源头处理,带来了革命性优势:一是超低延迟,特征提取与信号感知几乎同步,极大提升了系统实时性;二是超低功耗,避免了海量原始数据的移动与转换,能耗可降低数个数量级;三是系统级简化与鲁棒性,减轻了后端处理负担,降低了系统复杂度,并因传输数据量锐减而提升了抗干扰能力和隐私安全性。这使得红外感知系统能够嵌入到对尺寸、重量、功耗有极端限制的边缘设备中,开辟了全新的应用场景。

4　光、机、电、器微系统红外芯片

红外探测技术的演进正经历一场深刻的范式转移:其发展主轴已从追求单一光电转换性能的极致,迈向将光学、电子、计算等多功能模块集成于微尺度芯片的“系统级”创新。这一跨越的核心成果,是催生了“红外微系统芯片”这一全新概念,其本质是实现从“红外探测器”到“具备智能感知能力的红外光电微系统”的质变,最终达成“器件即系统”的终极目标。

4.1　从“功能器件”到“微系统芯片”

红外微系统芯片的核心内涵可精炼为“光、机、电、器”四位一体的深度融合,即光学系统微纳化、机械结构 MEMS(Micro-electro-mechanical system,微机电系统)化、读出电路集成化、与探测器本体构成一个不可分割的有机整体。

传统红外探测器的角色是链路上的一个“功能节点”——将入射的红外光子高效地转换为电信号,其性能优劣主要由比探测率、响应率、响应时间等本征参数界定。然而,在航空航天、武器装备等新兴应用中,对系统的体积、功耗、实时性和智能化提出了空前苛刻的要求。传统“探测器+分离式镜头+独立读出电路+后端处理器”的架构模式,因数据带宽瓶颈、传输延迟、功耗体积巨大等问题,已难以满足需求。

因此,“红外微系统芯片”的内涵被开拓出来。它是指通过先进的微纳制造与集成工艺,将光学调控、光电转换、信号读出、信息预处理乃至初步的智

能决策等多个功能层，在三维空间内进行高密度异质异构集成，最终形成一颗功能完整的独立芯片。这颗芯片的输入是原始的红外辐射，输出则是经过处理、具有直接应用价值的特征信息或决策信号。这标志着红外技术从提供“数据”的器件，进化为提供“信息”或“答案”的自主微系统。

4.2 三维异质集成与仿生智能

如图9所示，在物理架构层面，实现红外微系统芯片的物理途径是异质异构集成。将不同材料体系（如III-V族化合物半导体、硅、锗、二氧化钒等）、不同工艺节点（微米级MEMS与纳米级CMOS（Complementary metal oxide semiconductor，互补金属氧化物半导体））、不同功能器件（光子器件、传感器、模拟电路、数字逻辑、存储器）通过先进的封装与互连技术，将这些离散的功能单元在三维空间内进行高密度、高性能的系统性集成[41-45]，完成从离散的“探测组件”到集成的“智能感知节点”的升级[46]。

第一层（底层）：综合光管理。利用超构表面、光子晶体等人工微结构，直接在探测器像元上实现高效吸光、偏振滤波、光谱拆分甚至波前调制。这取代了大部分笨重的体外光学元件，将光学调控功能“芯片化”。

第二层（中间层）：高性能光电转换与电调控。采用碲镉汞、二类超晶格等高性能红外材料，通过硅基读出电路异质集成技术，实现低噪声信号读取。同时，集成微纳驱动的电调控单元，实现对探测参数（如偏压、积分时间）的像素级快速自适应调整。

第三层（上层）：片上预处理与智能化。这是实现“智能”的关键。通过三维堆叠技术，将专门处理模拟或数字信号的硅基处理单元（如模拟存算一体单元、脉冲神经网络芯片）垂直互联在光电转换层之上。信号无需离开芯片，就能完成特征提取、数据压缩、事件检测甚至简单的模式识别，将海量的原始数据流转化为极简的特征信息流。

仿生结构的引入解决了传统平面器件的根本局限。受人类视网膜是弯曲结构的启发，“类视网膜曲面红外探测器”应运而生。将脆性的红外焦平面阵列进行微纳米级的柔性化处理并集成在曲面基板上[47]，带来了革命性优势：它能够与后续的曲面光学系统（如仿生复眼透镜）无缝耦合，极大简化光学结构、减轻系统重量、消除边缘像差，并获得超大视场和更均匀的光学性能。这种仿生设计不仅是形状的改变，更是为实现与复杂光学系统的一体化集成铺平了道路，是“器件即系统”在物理形态上的首次体现。

在信息获取层面，类视网膜感光机制引入了一条仿生学的革新路径。它摒弃了传统焦平面阵列以固定帧率全局采样的工作模式，转而模仿生物视网膜中神经元异步、稀疏响应的工作原理，采用事件驱动型成像[48-49]。在这种模式下，每个像元独立工作，仅当感应到的光强变化超过设定阈值时，才输出一个包含像素地址、时间戳和变化极性（变亮或变暗）的“事件”脉冲。将这一原理应用于红外微系统芯片，将带来一系列颠覆性优势：首先，理论上极高的动态范围（>120 dB），能够同时清晰捕捉强热源（如火焰）和微弱热目标，避免了传统红外成像中常见的过曝与欠曝问题；其次，微秒级的时间分辨率，能够无运动模糊地捕获高速热物体的运动轨迹，实现了真正的“所见即所得”；最后，输出数据具有极高的稀疏性，静态热背景被天然过滤，仅传输场景中的动态热变化信息，从而从数据源头极大降

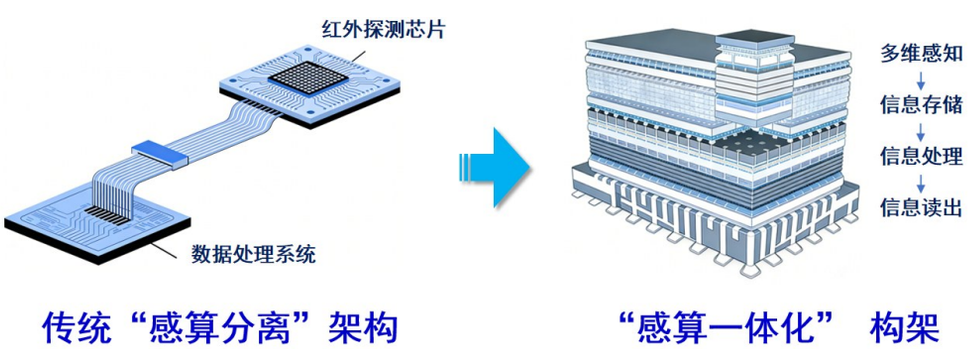

图9 三维异质集成红外芯片

Fig. 9 Three-dimensional heterogeneous integrated infrared detector

低了系统功耗、传输带宽及后续处理负荷。

在信息处理层面,与类视网膜感光天然契合的类神经视觉计算,是赋予微系统芯片智能的核心。它旨在在芯片上实现类似生物视觉通路的层级化、稀疏化、并行化处理,其硬件载体通常是神经形态计算单元。脉冲神经网络作为第三代神经网络模型,其基于事件驱动的异步脉冲通信机制,与类视网膜传感器的输出是天作之合。在红外微系统芯片中集成SNN(Spiking neural network,脉冲神经网络)硬件加速器[50],能够实时处理异步事件流,以极高的能效实现运动检测、模式识别等任务。为实现这一高效计算,存算一体架构成为关键技术[51-52]。它利用忆阻器、浮栅晶体管等新型器件,在存储器物理阵列中直接完成乘加运算,彻底消除数据在处理器与存储器间的频繁搬运,能效比相比传统架构可提升数个数量级。将存算一体阵列通过三维集成置于传感层下方,可构建出超低功耗的感知-处理闭环。更为前沿的是,通过模拟生物突触的可塑性,此类芯片还具备在线学习与自适应潜力,能够使其在变化的热环境中持续优化自身的识别与过滤策略,展现出初步的自主认知能力。

4.3　可重构与自主感知

在三维异质集成与仿生智能的技术基础上,“红外微系统芯片”的终极憧憬是走向动态可重构与自主自适应智能化。

如图10所示,未来的芯片将不是一个功能固化的模块,而是一个可根据任务和环境动态重构的感知平台。例如,通过电信号动态调整超构表面的结构,同一芯片可在“高分辨率成像”、“宽谱段光谱分析”和“特定偏振对比度探测”等模式间切换[53-55]。结合上层的智能处理单元,系统能够实时分析场景内容,自主决策最优的感知模式。当芯片识别到高速目标时,可自动切换至高帧频、低分辨率跟踪模式;当需要对静止区域进行精细分析时,则切换至高分辨率、多光谱鉴别模式。

最终,这样的红外微系统芯片将成为一个具有“反射弧”的自主感知终端。它能够模仿生物视觉系统,实现“感知-处理-反应”的闭环。例如,在安防监控中,它不仅能发现闯入者(感知),更能实时识别其行为特征(处理),并直接驱动报警或跟踪云台(反应),整个过程在芯片级完成,延时极低且隐私安全。

5　AI赋能红外探测器“智造”

红外光电探测器作为现代感知系统的核心,正经历着从单一成像到多维感知、从分立器件到片上系统的深刻跨越。然而,这一跨越背后,装备能力的建设正面临严峻挑战:传统的设计与制造工艺高度依赖人工经验,工艺窗口狭窄,成品率长期在低位徘徊,严重制约了高性能红外芯片的规模化、低成本应用。

随着工业制造向信息化、智能化发展,智能制造逐渐成为制造业升级的核心驱动力,以AI为代表的新一代信息技术,正以前所未有的深度与广度融

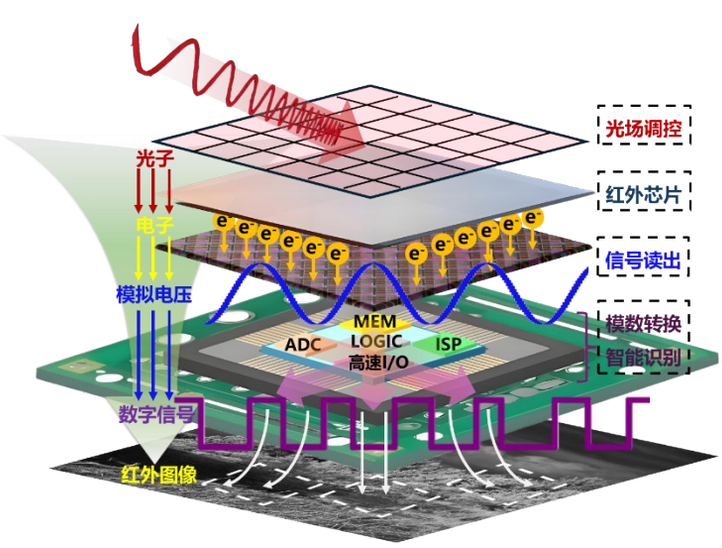

图10　可重构与自主感知红外芯片

Fig. 10　Reconstructable and autonomous perception infrared detector

入红外探测器的研发设计、生产制造、性能优化及系统应用全生命周期，将“经验驱动”的传统模式，推向一个以“数据驱动”为核心的全新时代，推动红外制造技术向全要素智能检测、自适应参数调整与确定性决策的高良率时代迈进，如图11所示。

5.1 传统设计制造面临核心挑战

红外探测器的制造是微纳工艺的典型应用，涉及复杂的材料生长、精密光刻、异质集成与封装测试。其核心挑战源于物理过程的极端复杂性与“黑箱”特性。例如，碲镉汞材料性能对组分、缺陷的敏感性极高，微纳光子结构的性能对加工误差极为敏感。传统模式高度依赖工程师的“经验配方”和“试错式”工艺调试，缺乏对海量工艺参数与最终性能之间定量、普适关系的深刻理解。这导致生产过程一致性差，器件性能离散度高，良率提升遭遇瓶颈。同时，传统质量检测多依赖于人工抽检或简单的阈值判断，难以发现早期、微弱的潜在缺陷，更无法预测器件在长期使用中的可靠性风险。

传统“试错法”或基于有限参数扫描的正向设计，已难以应对红外探测器（尤其是新型多维感知探测器）日益增长的设计自由度与性能优化需求。当前各研究机构正积极探索“智能模型+高通量实验数据”的逆向设计范式。该范式通过机器学习模型（如深度神经网络、生成对抗网络）建立探测器微观结构（如光子晶体、超表面图案、材料组分梯度）与宏观性能（如量子效率、光谱响应、偏振消光比）之间的非线性映射关系[56-58]。设计目标被转化为模型的输入条件，由模型反向生成最优的器件结构参数，极大加速了新器件的创新周期。

5.2 AI赋能芯片工艺全要素智能检测

在晶圆加工、封装测试等生产环节，AI赋能主要通过机器视觉和过程数据分析发挥关键作用。传统“事后筛检”正在被在线、实时的“过程透视”所取代。通过将偏振成像、红外高光谱分析等先进光学检测手段与AI视觉算法深度融合，系统能够以前所未有的精度和速度解析制造过程中的多维信息。例如，AI模型可以实时分析外延薄膜生长过程中的光谱反射曲线，精准判断组分均匀性与缺陷密度；在光刻后，通过高分辨率偏振扫描，识别出人眼和传统算法无法察觉的纳米级线宽偏差或结构缺陷。海康威视等企业已将AI视觉大模型应用于电路板焊接缺陷的自动化检测，效率提升达80%[59]，类似技术可直接迁移至探测器、读出电路的质检中。

这种智能检测的核心在于“全要素”数据获取与关联分析。AI系统不仅捕捉单一图像，更能同步处理光谱、偏振、相位等多维光场信息，并与每一道工艺的数百个参数（温度、压力、气体流量、时间等）进行时空关联。通过深度学习，系统能够建立起从原材料特性、中间工艺状态到最终器件性能的完整数字孪生模型[60-63]。这使得质量控制从事后判别，提前到事中预警乃至事前预测，将缺陷扼杀在萌芽状态，从根本上提升产线的一次通过率。

5.3 自适应参数调整与确定性决策

更具颠覆性的变革发生在工艺控制本身。AI驱动的逆向设计正在改变芯片的诞生方式。研究人员通过智能模型与高通量实验数据相结合，可以反向推导出为实现特定探测性能（如高灵敏度、特定光谱响应）所需的最佳微纳结构与材料参数。这

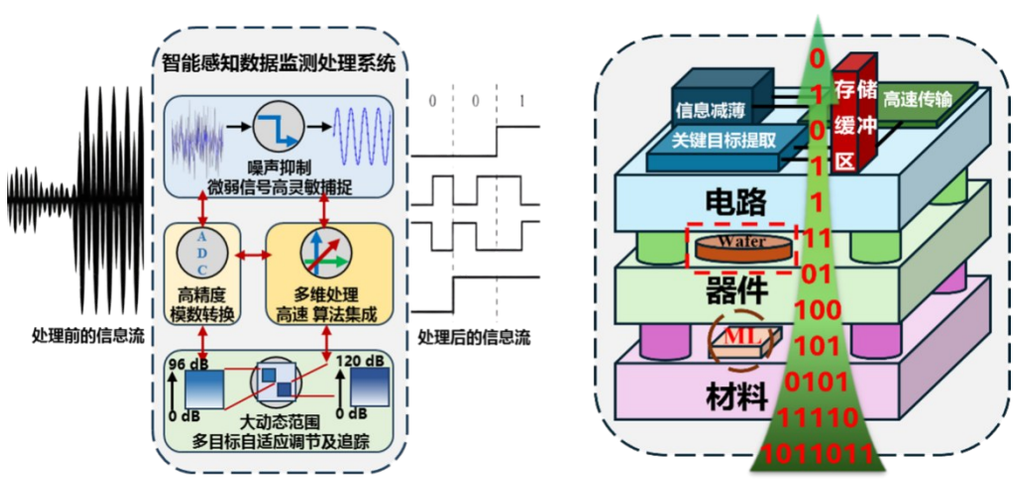

图11 AI赋能红外芯片工艺

Fig. 11 AI-empowered infrared detector manufacturing process

打破了依赖直觉和仿真的传统正向设计局限。

在制造端,固定不变的“静态工艺配方”正在演进为可实时自适应的“动态优化系统”。基于生产过程中收集的海量数据,AI模型能够实时感知工艺环境的微小波动(如反应室温度的毫秒级起伏),并瞬间计算并调整关键执行参数(如刻蚀射频功率、成结离子注入能量),以补偿偏差,确保每一片晶圆都运行在最优工艺窗口内。这种“感知-决策-执行”的闭环控制,将工艺一致性提升到全新高度,是实现高良率规模化制造的关键。

最终,这一能力导向“确定性决策”。在芯片封装与测试阶段,AI可以根据前端制造的全流程数据,智能预测每个芯片的最终性能区间和潜在失效模式,并为其匹配最合适的应用场景与校准参数,实现从“制造好芯片”到“制造恰好符合需求的芯片”的跨越。

5.4　器件即系统的红外智慧生态

极致智能的变革远不止于制造车间,它正在塑造一个覆盖“芯片-模组-系统-应用”的完整智慧生态。其终极目标是实现“器件即系统”的智能感知。这一趋势体现在两个方面:

一方面,是边缘智能与感算一体化的深度融合。为了满足实时性、低功耗与数据安全的需求,人工智能正从云端向传感器边缘迁移。新型红外探测器通过三维异质集成技术,将AI计算单元(如基于存内计算架构的神经形态芯片)与传感单元直接堆叠融合。这使得探测器在获取红外图像的同时,就能在片上完成特征提取、目标识别乃至行为分析,直接输出结构化的语义信息,而非原始的像素数据。例如,一款集成了边缘AI的红外热像仪,可以直接报警“发现异常温度人员入侵”,而不是仅仅提供一幅热图。

另一方面,是全生命周期数据流的闭环优化。从芯片设计仿真、制造生产、终端应用乃至野外运维,所有环节产生的数据都将接入统一的智慧平台。应用端反馈的真实场景性能数据(如在极端环境条件下某批芯片的响应衰减),可以反向驱动前端的材料设计改进和工艺参数优化。这个持续迭代的数据闭环,使得红外技术生态系统具备了自我学习、自我进化的能力。

6　结语

第四代红外探测器代表了红外探测技术的根本性变革,其核心特征是从单一光强探测向光场多维信息获取转变,从分立系统向片上集成智能处理转变。本文梳理了红外探测器的发展脉络,从功能集成、学科发展、技术演进等方面探析了第四代红外探测器的定义,分析了其技术内涵、核心特征和发展路径,探讨了面临的技术挑战和未来发展方向。

可以预期,红外探测器将沿着“挑战光强探测极限→光场多维信息协同感知→片上智能化→红外微系统芯片(类神经视觉)”的趋势发展。随着人工微结构设计、三维集成工艺和智能处理算法的不断突破,AI赋能的智能制造生态将成为推动第四代红外探测器由理论构想向实际应用转化的重要驱动力。

References

[1] YE Zhen-Hua, LI Hui-Hao, WANG Jin-Dong, et al. Recent hotspots and innovative trends of infrared photon detectors [J]. Journal of INFRARED AND MILLIMETER WAVES, 2022, 41(01): 15-39.
(叶振华, 李辉豪, 王进东, 等. 红外光电探测器的前沿热点与变革趋势[J]. 红外与毫米波学报), 2022, 41(1): 15-39.

[2] Rogalski A, Martyniuk P, Kopytko M. Challenges of small-pixel infrared detectors: a review[J]. Reports on Progress in Physics, 2016, 79(4): 46501.

[3] LI Ya-Ran, BAO Ha-Chen, SUN Sheng-Li. Peering into Aerospace Infrared Remote Sensing Detection Technology: Evolutionary Patterns and Development Trends [J]. Aerospace Shanghai, 2024, 41(3): 25-36.
(李亚冉, 保昊辰, 孙胜利. 透视空天红外遥感探测技术: 演进规律与发展趋势[J]. 上海航天(中英文)), 2024, 41(3): 25-36.

[4] Yu X, Ji Y, Shen X, et al. Progress in Advanced Infrared Optoelectronic Sensors[Z](2024).

[5] Hu W-D, Li Q, Chen X-S, et al. Recent progress on advanced infrared photodetectors [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(12): 120701-120735.

[6] Saleem M I, Kyaw A K K, Hur J. Infrared Photodetectors: Recent Advances and Challenges Toward Innovation for Image Sensing Applications[J]. Advanced Optical Materials, 2024, 12(33): 2401625.

[7] Ge H-N, Xie R-Z, Guo J-X, et al. Artificial micro- and nano-structure enhanced long and very long-wavelength infrared detectors[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(11): 110703-110718.

[8] Chen J, Wang J, Li X, et al. Recent Progress in Improving the Performance of Infrared Photodetectors via Optical Field Manipulations[Z](2022).

[9] Hu W Da, Li Q, Chen X S, et al. Recent progress on advanced infrared photodetectors [J]. Wuli Xuebao/Acta Physica Sinica, 2019, 68(12).

[10] Shen B, Lv J, Liang J, et al. Research on the Processing of Image and Spectral Information in an Infrared Polarization Snapshot Spectral Imaging System[Z](2024).

[11] Hamdoh A, Gao Y, Spires O, et al. Short-wave infrared (SWIR) polarization imaging using division-of-focal-plane imaging polarimeter[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 22577.
[12] Zhang L, Zhou C, Liu B, et al. Real-time machine learning - enhanced hyperspectro-polarimetric imaging via an encoding metasurface[J]. Science Advances, 2025, 10(36): eadp5192.
[13] SUN Zhi-Shen, ZHANG Xu, WANG Su-Hui, et al. Fast Spectral Acquisition Method Based on Compressed Sensing for Liquid Crystal Tunable Filters[J]. Infrared Technology , 2021, 43(7): 635-642.
(孙栉珅, 张旭, 王宿慧, 等. 基于压缩感知的液晶可调谐滤波器光谱快速采集方法[J]. 红外技术), 2021, 43(1): 635.
[14] WANG Bo-Wen, ZHANG Xu, GUAN Hai-Tao, et al. Computational Imaging Based on Focal Plane-Coded Modulation: A Review (Invited)[J]. Acta Optica Sinica (Online), 2024, 1(1): 0111001.
(王博文, 张许, 管海涛, 等. 基于焦平面编码调控的计算成像:研究现状与发展趋势(特邀)[J]. 光学学报(网络版)), 2024, 1(1): 0111001.
[15] Bian L, Zhan X, Yan R, et al. Physical twinning for joint encoding-decoding optimization in computational optics: a review[J]. Light: Science & Applications, 2025, 14(1): 162.
[16] LI Wen-Jie, Review of Imaging Spectrometer Based on Linear Variable Filter[J]. Infrared, 2015, 36(3): 1-7.
(李文杰. 基于线性渐变滤光片的成像光谱仪综述[J]. 红外), 2015, 36(3): 1-7.
[17] DU Pei-sheng, GUO jing, DONG Qian-min. Application of Liquid Crystal Tunable Filter in Multispectral Imager[J]. Infrared, 2007(11): 4-8.
(杜培胜, 郭靖, 董前民. 液晶可调谐滤光片及其在光谱仪上的应用[J]. 红外), 2007(11): 4-8.
[18] LÜ Jin-Guang, LIANG Jing-Qiu, ZHAO Bai-Xuan, et al. Interference Modulated Fourier Transform Spectral Imaging Technology (Invited)[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(2): 0200004.
(吕金光, 梁静秋, 赵百轩, et al. 干涉调制傅里叶变换光谱成像技术(特邀)[J]. 光学学报), 2025, 45(2): 0200004.
[19] Le Coarer E, Blaize S, Benech P, et al. Wavelength-scale stationary-wave integrated Fourier-transform spectrometry[J]. Nature Photonics, 2007, 1(8): 473-478.
[20] Hou Y, Cui H, Hu C, et al. Mid-Infrared on-Chip Computational Spectrometer Based on Plasmonic Metasurfaces[C]//2024 Asia Communications and Photonics Conference (ACP) and International Conference on Information Photonics and Optical Communications (IPOC). 2024: 1-5.
[21] Liu W, Wan Y, Yu H, et al. Miniature snapshot mid-infrared spectrometer based on metal-insulator-metal metasurface[J]. Journal of Optics, 2024, 26(8): 85003.
[22] Wei R, Dong Z, Chi C, et al. High-Capacity Full-Parameter Optical Multiplexing with Metasurfaces[J]. Advanced Functional Materials, 2025, n/a(n/a): e07120.
[23] ZHANG Jun-Chao, WU Cai-Yun, LUO Yi-Dong, et al. Research status and prospects on super-resolution imaging technology for division-of-focal-plane polarimeters (invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2025, 54(7): 20240165
(张俊超, 伍彩云, 罗毅东, 等. 分焦平面偏振超分辨成像技术的研究现状与展望(特邀)[J]. 红外与激光工程), 2025, 54(7): 20240114-20240165.
[24] Rubin N A, D'Aversa G, Chevalier P, et al. Matrix Fourier optics enables a compact full-Stokes polarization camera[J]. Science, 2019, 365(6448): eaax1839.
[25] Deng J, Shi M, Liu X, et al. An on-chip full-Stokes polarimeter based on optoelectronic polarization eigenvectors[J]. Nature Electronics, 2024, 7(11): 1004-1014.
[26] Ahmed A, Zhao X, Gruev V, et al. Residual interpolation for division of focal plane polarization image sensors[J]. Optics Express, 2017, 25(9): 10651-10662.
[27] Dely H, Chomet B, Bonazzi T, et al. Heterodyne coherent detection of phase modulation in a mid-infrared unipolar device[J]. Optics Express, 2023, 31(19): 30876-30883.
[28] Shan S, Zhao F, Li Z, et al. A Comprehensive Review of Optical Metrology and Perception Technologies[Z](2025).
[29] Robert C, Michau V, Fleury B, et al. Mid-infrared Shack-Hartmann wavefront sensor fully cryogenic using extended source for endoatmospheric applications[J]. Optics Express, 2012, 20(14): 15636-15653.
[30] Wang Y, Huang K, Fang J, et al. Mid-infrared single-pixel imaging at the single-photon level[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 1073.
[31] Liu S-K, Yang C, Liu S-L, et al. Up-Conversion Imaging Processing With Field-of-View and Edge Enhancement[J]. Physical Review Applied, 2019, 11(4): 44013.
[32] Cui T J, Qi M Q, Wan X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(10): e218-e218.
[33] Li L, Ruan H, Liu C, et al. Machine-learning reprogrammable metasurface imager[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 1082.
[34] Huang M, Chen W, Zhu Y, et al. An Adaptive Weighted Residual-Guided Algorithm for Non-Uniformity Correction of High-Resolution Infrared Line-Scanning Images[Z](2025).
[35] Li B, Chen W, Zhang Y. A Nonuniformity Correction Method Based on 1D Guided Filtering and Linear Fitting for High-Resolution Infrared Scan Images[Z](2023).
[36] Li M, Wang Y, Sun H. Single-Frame Infrared Image Non-Uniformity Correction Based on Wavelet Domain Noise Separation[J]. Sensors, 2023, 23(20).
[37] Sheng Y, Yun L, Shi J, et al. Design of the cooled IRFPA real-time non-uniformity correction system based on FPGA[C]//Proc.SPIE. 2011, 8197: 81970G.
[38] Feng W, Qin T, Tang X. Advances in Infrared Detectors for In-Memory Sensing and Computing[Z](2024).
[39] Gao H, Jiang X, Ma X, et al. Bio-inspired mid-infrared neuromorphic transistors for dynamic trajectory perception using PdSe2/pentacene heterostructure[J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 5241.
[40] Xu H, Xie R, Miao J, et al. Critical band-to-band-tun-

nelling based optoelectronic memory[J]. Light: Science & Applications, 2025, 14(1): 72.
[41] Sonde S, Sasikumar K, Chang Y, et al. Material considerations for vertical integration of IRFPAs (Conference Presentation)[C]//Proc.SPIE. 2022, PC12234: PC122340A.
[42] Venditti A, Altin E F, Gubinelli W, et al. Plasmonically Enhanced ALSCN Nanoplates As Uncooled And Ultra-Fast Single-Pixel Detectors For IR Imaging [C]//2025 IEEE 38th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). 2025: 1098-1101.
[43] LIN Hong-Tao, SUN Bo-Shu, MA Hui, et al. Review of mid-infrared on-chip integrated photonics (Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(1): 202111.
(林宏焘, 孙博姝, 马辉, 等. 中红外片上集成光电子综述(特邀)[J]. 红外与激光工程), 2022, 51(1): 20211111-20211114.
[44] WANG Zhi-Qiang, YANG Ning, ZHANG Shao-Chun, et al. Challenges and opportunities in the development of reliability technology for heterogeneous integrated microsystems[J]. Microelectronics & Computer, 2023, 40(11): 61-71.
(汪志强, 杨凝, 张劭春, 等. 异质异构集成微系统可靠性技术发展的挑战和机遇[J]. 微电子学与计算机), 2023, 40(11): 61-71.
[45] ZHANG Dong-liang, YANG Ning, LIU Da-chuan, LIN Xiao, WANG Wei-ping, DING Zi-yu, HU Xiao-yan, WANG Zhi-qiang. New progress in heterogeneous integration of compound semiconductors on silicon[J]. LASER & INFRARED, 2019, 49(1): 9~19
(张东亮, 杨凝, 刘大川, 等. 硅基异质集成化合物半导体技术新进展[J]. 激光与红外), 2019, 49(1): 9-19.
[46] Gao Y, Du J, Liu F, et al. A novel chip-scale heterogeneous integration intelligent micro-system of short wave infrared imaging [J]. Infrared Physics & Technology, 2023, 132: 104737.
[47] Guenter B, Joshi N, Stoakley R, et al. Highly curved image sensors: a practical approach for improved optical performance[J]. Optics Express, 2017, 25(12): 13010-13023.
[48] He M, Ai Y, Lu W, et al. An Event-Driven Motion Perception ROIC for Cryogenic Infrared Focal Plane Arrays [J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(14): 27394-27403.
[49] Alsaad Z M, Logan J V, Morath C P, et al. DC characteristics of a dynamic vision sensor's photoreceptor circuit evaluated for event-based sensing in the mid-wave infrared[J]. Journal of Applied Physics, 2024, 136(18): 184503.
[50] Qi X, Li X, Lou Y, et al. A 0.67-to-5.4 TSOPs/W Spiking Neural Network Accelerator With 128/256 Reconfigurable Neurons and Asynchronous Fully Connected Synapses[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2024, 59(10): 3366-3377.
[51] Wang Z, Zhang J, Zhang Z, et al. Near-Sensor Neuromorphic Computing System Based on a Thermopile Infrared Detector and a Memristor for Encrypted Visual Information Transmission.[J]. Nano letters, 2025, 25(19): 8049-8057.
[52] Li T, Miao J, Fu X, et al. Reconfigurable, non-volatile neuromorphic photovoltaics [J]. Nature Nanotechnology, 2023, 18(11): 1303-1310.
[53] Cotrufo M, Sulejman S B, Wesemann L, et al. Reconfigurable image processing metasurfaces with phase-change materials[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 4483.
[54] Huang Z, Wang Z, Cheng Y, et al. Metasurfaces empower optical multiparameter imaging: A review[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2025, 68(7): 274201.
[55] She Y, Ji C, Huang C, et al. Intelligent reconfigurable metasurface for self-adaptively electromagnetic functionality switching[J]. Photonics Research, 2022, 10(3): 769-776.
[56] Lin Q, Li C, Chen J, et al. Inverse Design of Manufacturable Infrared Metasurfaces Based on Multimodal Deep Learning Methods[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2025, 17(28): 40951-40963.
[57] Xu X, Li Y, Du L, et al. Inverse Design of Nanophotonic Devices Using Generative Adversarial Networks with the Sim-NN Model and Self-Attention Mechanism[Z](2023).
[58] Pan Z, Pan X. Deep Learning and Adjoint Method Accelerated Inverse Design in Photonics: A Review[Z](2023).
[59] Hikvision. Hikvision Showcases Over 100 "IoT Perception + AI" Software and Hardware Products at China International Industry Fair[EB](2025).
(海康威视. 海康威视上百款"物联感知+AI"软硬件产品亮相中国工博会[EB])(2025).
[60] Choi J, Kim S B. Multi-Stage Process Diagnosis Networks in Semiconductor Manufacturing [J]. IEEE Access, 2024, 12: 39495-39504.
[61] Chen Q, Qin W, Xu H. A multimodal hierarchical learning approach for virtual metrology in semiconductor manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2025, 80: 194-205.
[62] Alamin K S S, Appello D, Beghi A, et al. An AI-Enabled Framework for Smart Semiconductor Manufacturing [C]//2024 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE). 2024: 1-6.
[63] Frittoli L, Carrera D, Rossi B, et al. Deep open-set recognition for silicon wafer production monitoring[J]. Pattern Recognition, 2022, 124: 108488.