引用格式：王子晨, 王洋, 吴佳澳, 等. 有机图像传感器集成技术研究进展 [J]. 电子科技大学学报, 2026, 55(5): 729-748.
Wang Zichen, Wang Yang, Wu Jia'ao, et al. Advances in integration technologies for organic image sensors[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2026, 55(5): 729-748. (in Chinese)

有机图像传感器集成技术研究进展

王子晨，王 洋，吴佳澳，蒋亚东，太惠玲*

（电子科技大学光电科学与工程学院，成都 611731）

摘要：图像传感器是获取视觉信息的核心器件，在消费电子、工业检测、医学成像和机器视觉等领域应用广泛。传统的硅基互补金属氧化物半导体（CMOS）图像传感器虽在像素尺寸、阵列规模、读出速度和片上处理等方面技术成熟，但面向光谱拓展、柔性贴合和超大面积低温制造等需求，仍受到硅吸收边界、滤色光损失及常规晶圆工艺的制约。有机半导体具有吸收光谱可调、目标波段吸收系数较高、可低温成膜、柔性和可大面积加工等特点，已在可见光与彩色成像、近红外成像、紫外及间接 X 射线成像中展现潜力。该文介绍有机图像传感器的器件与像素架构及多层级性能指标，系统评述无背板或外接读出、薄膜晶体管（TFT）有源矩阵和 CMOS/读出集成电路（ROIC）异质集成 3 类路线，比较其集成特点与适用场景，并总结代表性应用。现有研究显示，有机光敏层的成像表现，受到工作偏压、界面选择性、像素节点、阵列均匀性和读出电路匹配度的共同影响；其近期价值更可能体现为对成熟硅技术的功能补充，而阵列均匀性、长期可靠性、测试标准化和规模化制造良率仍需进一步提升。

关键词：有机光电探测器；图像传感器；薄膜晶体管；CMOS 集成；异质集成
中图分类号：TN29 **文献标志码：**A DOI: 10.12178/1001-0548.2026151

Advances in integration technologies for organic image sensors

WANG Zichen, WANG Yang, WU Jia'ao, JIANG Yadong, and TAI Huiling*

(School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Image sensors are essential devices for acquiring visual information and are widely used in consumer electronics, industrial inspection, medical imaging, machine vision, and other fields. Although conventional silicon-based complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) image sensors are technologically mature in terms of pixel miniaturization, array scale, readout speed, and on-chip processing, their ability to meet emerging demands for extended spectral response, conformal sensing, and low-temperature fabrication over ultralarge areas remains constrained by the spectral absorption limit of silicon, optical losses introduced by color filters, and conventional wafer-based processing. Organic semiconductors offer tunable absorption spectra, relatively high absorption coefficients in targeted wavelength bands, low-temperature film formation, mechanical flexibility, and compatibility with large-area processing. Consequently, they have demonstrated considerable potential in visible and color imaging, near-infrared imaging, ultraviolet imaging, and indirect X-ray imaging. This review presents the device and pixel architectures of organic image sensors together with their multilevel performance metrics. Three integration routes are systematically examined: backplane-free or external-readout integration, thin-film transistor (TFT) active-matrix integration, and heterogeneous integration with CMOS/readout integrated circuits (ROICs). Their integration characteristics and applicable scenarios are compared, and representative applications are summarized. Existing studies indicate that the imaging performance of organic photosensitive layers is jointly governed by the operating bias, interfacial selectivity, pixel-node design, array uniformity, and compatibility with readout circuitry. In the near term, organic image sensors are more likely to complement mature silicon technologies than to replace them. Nevertheless, further improvements are required in array uniformity, long-term reliability, testing standardization, and manufacturing yield at scale.

Key words: organic photodetector; image sensor; thin-film transistor; CMOS integration; heterogeneous integration

收稿日期：2026−08−26
基金项目：国家自然科学基金联合基金项目（U25A20416）；国家自然科学基金杰出青年基金（62225106）
作者简介：王子晨，博士生，主要从事有机图像传感器方面的研究。
*通信作者 E-mail: taitai1980@uestc.edu.cn

图像传感器已成为消费电子、工业检测、医学成像和安全监测等系统获取视觉信息的核心部件。以硅基互补金属氧化物半导体（complementary metal–oxide–semiconductor, CMOS）为代表的技术路线依托成熟的微电子制造平台，在像素缩小、阵列规模、读出速度和片上处理等方面具有显著优势，并形成了可见光成像及多类扩展光谱应用。但滤色片分光会带来光损失，硅吸收边界限制部分近红外及更长波段响应，刚性晶圆形态也不利于曲面贴合和超大面积低温制备[1-4]。这些需求促使研究者开发新的光敏薄膜，并探索其与现有薄膜晶体管（thin-film transistor, TFT）或 CMOS 读出电路的集成技术，以满足未来应用场景的成像需求。

有机光电探测器（organic photodetector, OPD）是其中的重要候选，其核心光敏薄膜为有机半导体。有机半导体可通过分子结构和给受体组合，调节吸收范围、带隙与颜色选择性；较高的目标波段吸收系数允许使用较薄的感光层，溶液涂布、印刷或低温蒸镀等制备工艺则为后端覆盖、大面积阵列和柔性基底留出工艺空间[2-3, 5-7]。在集成层面，OPD 既可构成交叉电极无源阵列，也可覆盖在 TFT 背板上，还可直接沉积在 CMOS/读出集成电路（read-out integrated circuit, ROIC）上，由下层电路完成积分、放大和数字化。现有工作已在可见光与彩色成像、近红外成像、紫外和间接 X 射线成像中给出阵列或系统演示[4-7]。

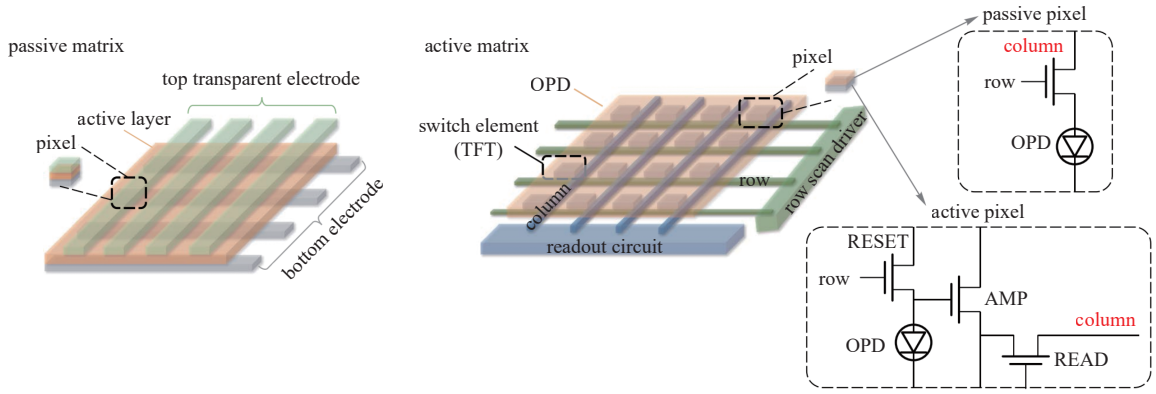
本综述首先介绍 OPD 器件与像素阵列架构，并分别阐述图像传感器和光探测器性能参数的定义和物理意义。随后按无源像素集成、TFT 大面积背板集成、CMOS/ROIC 异质集成路线比较有机图像传感器的代表性进展。有机图像传感器的应用部分按照成像波长进行分类，分别介绍可见光与彩色成像、近红外成像、紫外和间接 X 射线等光谱拓展型成像实例。

1 有机图像传感器架构与性能参数

1.1 像素与器件架构

有机图像传感器的性能与像素寻址方式、读出条件及感光器件结构密切相关。基于此，本节首先比较无源矩阵与有源矩阵在像素寻址和电荷读取方面的差异，随后介绍不同类型 OPD 的器件架构与工作机制。

如图 1a 所示，无源矩阵成像阵列通常由相互正交的行电极和列电极构成，有机光敏层位于上下电极之间，行列电极的交叉区域定义为一个探测像素。通过依次选通相应的行、列电极，可以读取不同位置像素产生的光电信号。该结构无须在每个像素内部集成独立的开关或放大器件，因而具有结构简单、有效感光面积大及制备成本低等优点。然而，在像素寻址过程中，未选中像素的漏电流也可能耦合至读出线路，产生串扰和附加噪声。随着阵列规模和像素密度的提高，寄生电阻与电容的影响更加明显，容易造成信噪比下降，因此无源矩阵结构在高分辨率和高质量成像中的应用受到一定限制。如图 1b 所示，有源矩阵将开关、复位、缓冲或电荷转移功能布置在像素内，可提高读出控制能力并降低列线负载，但会占用像素面积并引入更多寄生电容。将光敏薄膜覆盖在硅基电路上方可增加器件感光面积；进一步采用薄膜钉扎光电二极管或转移栅结构，有望通过电荷转移、复位和读出分离来抑制残像及复位噪声，但其性能依赖薄膜电极、转移势垒和硅读出节点之间的电学耦合。对于大面积 TFT 阵列，有源矩阵则以每像素开关换取更低串扰和更稳定的行列寻址[8-10]。

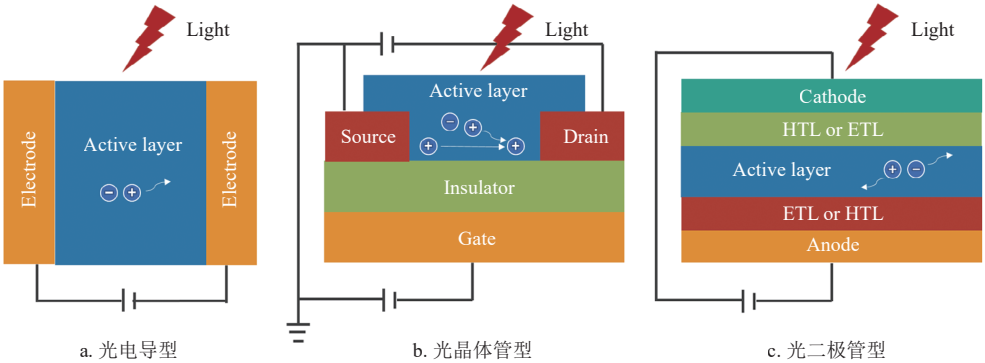


a. 无源矩阵的示意图　　b. 包含被动像素和主动像素的有源矩阵的示意图

图 1　无源矩阵和有源矩阵的示意图[5]

对于有机图像传感器而言，还需考虑 OPD 的结构对集成的影响。根据器件结构及载流子调控方式的不同，OPD 主要分为光电导型有机光探测器（photoconductor-OPD, PC-OPD）、有机光晶体管（PT-OPD 或 OPT）和光二极管型有机光探测器（PD-OPD）。三类器件在光生载流子的产生、传输与收集机制方面存在明显差异，因而表现出不同的增益、暗电流、响应速度和工作电压。

如图 2a 所示，PC-OPD 通常由有机光敏层及与其形成欧姆接触的两个电极构成，具有结构简单、制备方便和易于集成等特点。暗态下，有机半导体中的自由载流子浓度较低，器件呈现较高电阻；光照后，活性层吸收光子并产生激子，激子在外加偏压或材料内部局域电场作用下解离为自由电子和空穴，随后向两侧电极迁移并形成光电流。由于电子与空穴的迁移率及寿命存在差异，迁移较慢的载流子可被缺陷态俘获，而迁移较快的载流子在其复合前能够多次通过外电路，从而产生光电导增益。因此，PC-OPD 可获得较高的响应度，其外量子效率甚至可以超过 100%。然而，欧姆接触和较高的驱动偏压容易引起较大的载流子注入电流，使器件暗电流和噪声水平升高；同时，长寿命陷阱在提高增益的同时也会延长载流子释放时间，导致器件响应速度下降[9]。



a. 光电导型　　b. 光晶体管型　　c. 光二极管型

图 2　OPD 的 3 种器件结构[8]

PT-OPD 是一类具有光敏特性的有机场效应晶体管（field effect transistor, FET），主要由栅极、介电层、有机半导体沟道以及源极和漏极组成，结构如图 2b 所示。入射光被有机沟道吸收后产生光生载流子，进而改变沟道中的载流子浓度、接触势垒和源漏电流。与此同时，栅极电压（V_g）能够调控沟道载流子的积累或耗尽，因此器件输出可同时受到入射光强度和 V_g 的调制。在不同 V_g 条件下，PT-OPD 可表现出光伏效应或光电导效应。光生载流子的俘获可引起阈值电压漂移，并通过晶体管效应实现光电流放大。以 p 型沟道器件为例，当晶体管工作在积累模式时（$V_g < V_{TH}$，其中 V_{TH} 表示阈值电压），光伏效应占主导地位；而当器件处于耗尽状态（$V_g > V_{TH}$）时，源漏电流因光电导效应而随着光功率增大而增加[10]。得益于栅极对沟道电导的调控，PT-OPD 通常具有较高的响应度、较低的噪声电流和较高的比探测率。然而，该类器件一般需要较高的 V_g，且其工作电流较小、器件结构及制备工艺相对复杂。光生载流子的俘获与释放也可能造成阈值电压漂移、响应速度降低和迟滞现象[11]。

PD-OPD 通常采用阳极/有机活性层/阴极的垂直夹层结构，如图 2c 所示，其器件构型与有机太阳能电池相似。为抑制暗态下电极向活性层的载流子注入，并促进光生载流子的选择性输运，通常在活性层与电极之间引入电子传输层和空穴传输层。活性层一般由电子给体和电子受体材料组成，可采用平面异质结或本体异质结结构。PD-OPD 的光电转换过程主要包括光子吸收与激子产生、激子扩散、给受体界面处的激子解离，以及自由电子和空穴的传输与收集。在常规工作模式下，一个入射光子至多产生一对可收集的电子−空穴对，因此器件外量子效率通常不超过 100%；通过引入载流子陷阱和调控电极注入势垒，也可构建具有内部增益的光倍增型 PD-OPD[12]。

综上，像素架构与器件架构不存在脱离场景的统一最优解。光伏型 OPD 更适合强调低暗电流和低功耗的场景，光倍增结构适合弱光增益需求。阻挡或受阻输运结构面向较少元件的无源像素阵列寻址，有源像素和钉扎结构则更重视噪声控制、速度和电荷管理[13-16]。

1.2 有机图像传感器性能参数

有机图像传感器文献中的性能参数可分为成像系统、像素阵列和器件 3 个层级。系统层关注帧率、功耗、稳定性；像素阵列层关注满阱容量、动态范围、转换增益、光响应非均匀性（photo response non-uniformity, PRNU）、暗信号非均匀性（dark signal non-uniformity, DSNU）、串扰、缺陷像素和校正后残差等；器件层则主要描述光电转换和噪声起点，包括暗电流密度、响应度、外量子效率（external quantum efficiency, EQE）、比探测率和响应速度等。不同层级的指标回答不同问题，不能用单器件比探测率替代阵列 SNR，也不能用一幅代表性图像替代均匀性与良率统计[17-19]。

1.2.1 系统与可靠性指标

系统层的帧率与功耗共同决定阵列能否在规定数据吞吐和能源预算下连续工作，二者必须与阵列规模、位深及读出模式绑定报告；可靠性则进一步检验这些能力能否在时间和环境应力下保持。

1）帧率。帧率是单位时间内输出完整图像的次数。标明帧率的同时也应标明有效阵列规模、位深、ADC 并行数、接口速率和快门模式；曝光可与扫描读出重叠，滚动快门与全局快门在相同标称帧率下也具有不同的时间失真和存储要求[17, 20]。

2）功耗。图像传感器的平均功耗由规定工作周期内各电源轨的电压与电流积分得到。需要注意的是待机功耗、曝光功耗和连续视频功耗不能混用；如未选行在零偏下实现常关可显著降低阵列待机电流，但并不等于读出系统在成像时零功耗。跨阵列比较宜同时标明总功耗、每像素功耗或每帧能量，并说明阵列规模、帧率、位深和工作模式[21-22]。

3）稳定性。稳定性测试必须说明温度、湿度、氧气、光照、偏压、弯曲半径、循环次数、封装、采样间隔及失效判据；热处理后的性能保持、室温存储寿命、连续偏压寿命和机械循环属于不同试验，不能合并成一个“稳定”结论。器件保持率还不足以代表阵列可靠性，还应复测 PRNU、DSNU、坏点、校正参数和任务图像[23-24]。

1.2.2 像素阵列层指标

1）满阱容量。满阱容量表示像素在明显非线性或饱和前能够存储的最大信号电子数。实际满阱还可能受转移栅势垒、OPD 偏压窗口、源跟随器摆幅和 ADC 满量程限制，因此应从光电转换曲线的饱和点或线性偏离点测量，而不能只由版图电容推算。垂直有机膜像素可把光吸收与存储电容分开设计，但满阱增加通常会降低转换增益或增加面积和复位负担[20, 25]。

2）动态范围。器件层的线性动态范围（linear dynamic range, LDR）描述光电流保持规定线性的入射光强范围。动态范围应区分单次曝光、双转换增益、同步双灵敏度、同帧多曝光和跨帧合成；只有同时曝光并使用同一场景时刻的数据，才可称为同时捕获动态范围。不同线性判据、饱和判据和合成方式产生的分贝值不可直接比较[5, 21, 25]。

3）像素响应不均匀性。PRNU 描述均匀照明下不同像素光响应的固定离散。多帧平均用于压低时间噪声，但帧数、坏点剔除、照度梯度校正和暗场扣除方式必须说明。暗信号非均匀性 DSNU 与 PRNU 不同，它在暗场下统计像素偏置或暗电荷的空间离散；两者混合会把漏电、背板阈值漂移和光响应差异误归为同一问题[17, 21, 26]。

4）串扰。串扰表示目标像素或目标光谱通道中的激励在非目标像素或通道形成的响应。连续有机膜中的横向载流子扩散、透明层波导和散射会产生光学串扰，公共行列漏电、未选像素关断不足及层间电容则会产生电学串扰；颜色堆叠中还需区分上层未完全吸收造成的光谱泄漏与读出通道耦合[14, 17, 27-28]。

1.2.3 器件层指标

1）暗电流密度。暗电流是无光照时器件在给定偏压下输出的电流，暗电流密度用有效面积归一化，可表示为：

$$J_d = \frac{|I_d|}{A_{\text{eff}}} \tag{1}$$

式中，J_d为暗电流密度；I_d为暗态电流；A_{eff}为器件有效面积。对反向工作的 OPD 通常报告J_d的绝对值。该指标直接影响积分期间累积的暗电荷、暗电流散粒噪声和低照度下限，但它不是材料常数：电极注入、活性层热生载流子、陷阱辅助输运、针孔及边缘泄漏均可能贡献I_d。比较时至少应给出偏压或平均电场、温度、器件面积、暗置时间和扫描方向；面积缩放不符合比例关系时，还应单独讨论周边泄漏。仅报告“零偏暗电流”不能说明反向偏压阵列中的实际噪声[19, 29-30]。

2）响应度。响应度描述单位入射光功率所产生的净光电流，其定义为：

$$R = \frac{J_{\text{ph}}}{P_{\text{in}}} \tag{2}$$

式中，J_{ph}为光生电流密度；P_{in}为到达有效光敏区的光功率密度。R的单位为 A·W^{-1}，并随波长、偏压、光强和调制频率变化。光源标称功率不能直接替代P_{in}，光斑大于器件、存在窗口或透明电极损耗时，需要说明功率校准位置。光倍增型器件可获得很高的R，但增益可能同时放大暗电流并牺牲线性范围和速度，因此不能仅按峰值响应度评价成像能力[5, 13, 15]。

3）外量子效率。外量子效率表示入射光子转化为外电路收集电荷的比例，可由光子数定义，也可由响应度换算：

$$\mathrm{EQE}(\lambda)=\frac{J_{ph}}{P_{in}}\frac{hc}{q\lambda}\times 100\%=R\frac{hc}{q\lambda}\times 100\% \tag{3}$$

式中，h为普朗克常数；c为真空光速；q为元电荷；λ为入射光波长。EQE 以百分数表示，宽谱器件应报告完整光谱而非仅给峰值，颜色选择器件还应报告非目标波段残余响应。普通无内部增益光伏型 OPD 的 EQE 通常不超过 100%；光倍增型器件的 EQE 可超过 100%，此时表示一个入射光子触发了多于一个外电路电荷，而非能量转换效率超过 100%。EQE 比较必须绑定偏压、入射功率和波长步进，且不能忽略上层电极与堆叠膜对实际入射光的衰减[5, 27, 31]。

4）比探测率。噪声等效功率（NEP）表示产生信噪比为 1 所需的最小入射光功率。若i_n为带宽Δf内测得的均方根噪声电流谱密度，则噪声等效功率可表示为：

$$\mathrm{NEP}=\frac{i_nP_{in}}{J_{ph}}=\frac{i_n}{R} \tag{4}$$

NEP 的单位为 W·Hz$^{-1/2}$。进一步用面积归一化 NEP，比探测率 D^*可写为：

$$D^*=\frac{\sqrt{A}}{\mathrm{NEP}} \tag{5}$$

D^*的单位为 cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}，即 Jones。式 (5) 只有在 R、噪声、面积和频率条件一致时才可用于比较。部分文献未实测噪声谱，而是假设暗电流散粒噪声占主导，此时常用：

$$D^*_{\mathrm{shot}}\approx\frac{R}{\sqrt{2qJ_d}} \tag{6}$$

上述散粒噪声近似忽略了 1/f 噪声、热噪声、介质噪声、背景光噪声和读出电路噪声，可能高估真实探测率。因此，文中出现 D^*时应明确其来自实测噪声谱、积分噪声还是暗电流估算，并报告频率、带宽、偏压、面积和温度[5, 19, 32-33]。

5）响应速度。时域响应通常以归一化光电流从 10% 上升到 90% 的上升时间t_r，以及从 90% 下降到 10% 的下降时间t_f表示：

$$t_r=t_{90\%}-t_{10\%} \tag{7}$$

$$t_f=t_{10\%}-t_{90\%} \tag{8}$$

频域响应以−3 dB 带宽$f_{-3\mathrm{dB}}$表示，其定义及单极点近似关系为：

$$|H(f_{-3\mathrm{dB}})|=\frac{|H(0)|}{\sqrt{2}} \tag{9}$$

实测速度同时受载流子渡越时间和器件—负载 RC 常数限制，因而必须报告偏压、光脉冲宽度、调制深度、负载电阻、总电容、放大器带宽和判定方法。器件响应时间也不等于图像帧间隔；当阵列扫描、积分、采样和 ADC 占主导时，响应速度快的器件仍可能对应低帧率系统[5]。表 1 为有机图像传感器关键指标汇总。

表 1　有机图像传感器关键指标汇总

指标	定义或用途	指标关联的变量	测试层级	单位	参考文献
暗电流密度	暗态单位面积漏电	偏压、温度、面积、暗态时间	器件	A·cm^{-2}	[29-30]
外量子效率	入射光子到收集电荷的转换比例	波长、偏压、入射功率	器件	%	[27, 31]
响应度	单位入射光功率产生的光电流	波长、偏压、光功率密度、有效面积	器件	A·W^{-1}	[13, 15]
比探测率	面积和带宽归一化的弱光探测能力	噪声模型或实测噪声、带宽、面积	器件	Jones	[32-33]
带宽或响应时间	速度与可用调制范围	偏压、负载、电容、调制和判定方法	器件或像素	Hz或s	[5]
满阱容量	像素最大可存储电荷	像素尺寸、节点电容、偏压	像素	e$^-$	[20, 25]
动态范围	饱和端与噪声端之间的有效范围	曝光方式、噪声底、饱和条件	像素或系统	dB	[21, 25]
光响应非均匀性	均匀照明下的像素响应离散	阵列规模、照度、曝光、校正条件	阵列	%	[17, 26]
串扰	相邻像素或光谱层之间的信号耦合	像素间距、波长、堆叠层、计算定义	阵列或系统	%	[27-28]
帧率	单位时间输出完整图像的次数	阵列规模、读出方式、ADC条件	系统	帧·s^{-1}	[8, 20]
功耗	指定工作模式下的能量消耗	工作模式、阵列规模、帧率	系统	W或W·像素$^{-1}$	[14, 22]
稳定性	性能随时间和环境的保持程度	温度、湿度、偏压、时间、封装	器件或阵列	保持率或时间	[23-24]

2 有机图像传感器集成路线

按照感光层与寻址或读出平台的关系，将有机图像传感器归纳为 3 类集成路线：无背板或外接读出集成、TFT 大面积背板集成、OPD 与 CMOS 或 ROIC 异质集成。无集成背板或外接读出路线通过交叉电极、器件整流、增益或外部开关形成空间采样；TFT 路线把行选择和像素保持放入玻璃或塑料背板；CMOS/ROIC 路线则把复位、转移、放大、模数转换乃至片上计算交给硅电路[4, 8-9, 27, 34]。

2.1 无源阵列与外接读出集成

无背板路线不在每个像素内配置独立 TFT 或硅读出节点，而是利用相交的行列电极、器件整流或外部多路复用器完成寻址。无源阵列与外接读出集成主要演进表现为功能承担位置的变化：早期工作以直接交叉阵列验证低温和印刷制造可行性，随后通过阻塞二极管和光倍增机制将选通与增益移入两端子像素，并进一步把光谱选择、光强自适应和权重调制集成到电极或有机感光层中。

文献 [34] 以制造自由度为主线，采用数字印刷的去润湿自对准图案逐层构建 Ag/ZnO/PTB7:PC70BM/PEDOT:PSS 无源交叉阵列。16×16 阵列含 256 个有效面积约 250 μm×300 μm 的像素，总传感区约 8 mm×8 mm，覆盖约 400～740 nm。其意义在于将电极、功能层和互连纳入同一增材流程，而非刷新单器件纪录；原始图像在受光像素的共同行和列出现微弱非目标信号，论文将其解释为可能的电学或光学串扰；并同时指出，阵列数目受测量与读出仪器限制。因此，该文直接支持全数字印刷无源阵列的成像可行性，但未验证更大阵列的串扰和读出扩展。

文献 [14] 首先把 P3HT:PCBM 光电二极管与 P3HT 阻塞二极管垂直单片堆叠，提出用器件开启电压而不是像素 TFT 来隔离未选通支路。其关键并非简单增加一层二极管，而是以 NaF/Al 调节阻塞二极管内建电势：选中行施加−3 V 时像素导通，未选行保持 0 V 时像素处于常关状态，从而压低共享行列线上的串扰。该 5×5 阵列的像素为 800 μm×800 μm、像素间距 800 μm，证明两端子复合像素能够完成行列扫描，但较大的像素和较低阵列规模也说明开启电压离散性、线压降与薄膜均匀性尚未经历高密度阵列检验。图 3a、图 3b 和图 3c 分别为垂直器件原理示意图、阵列实物和行选/列读电路，3 幅图共同说明了阻塞二极管在这一 5×5 阵列中承担的选通和降低串扰电流的作用。

文献 [13] 把同一两端子垂直架构中的感光层改为供体富集的 P3HT:PCBM（100:1）光倍增体。在反向偏压下诱导空穴隧穿注入，使响应度超过 40 $A \cdot W^{-1}$；阻塞层则继续提供整流和未选像素抑制。8×8 阵列采用 500 μm×500 μm 像素及 500 μm 像素间距，在 523 nm、1 $\mu W \cdot cm^{-2}$ 下得到“T”形图像，说明光倍增可补偿像素缩小后的弱光电流损失。但该方案需要约−20 V 选通，且陷阱辅助增益伴随较慢释放、残像和像素间增益差异；文中受光像素光电流标准差达到平均值的 31.5%。该文直接展示了光倍增两端像素在特定高反向偏压下的弱光成像。

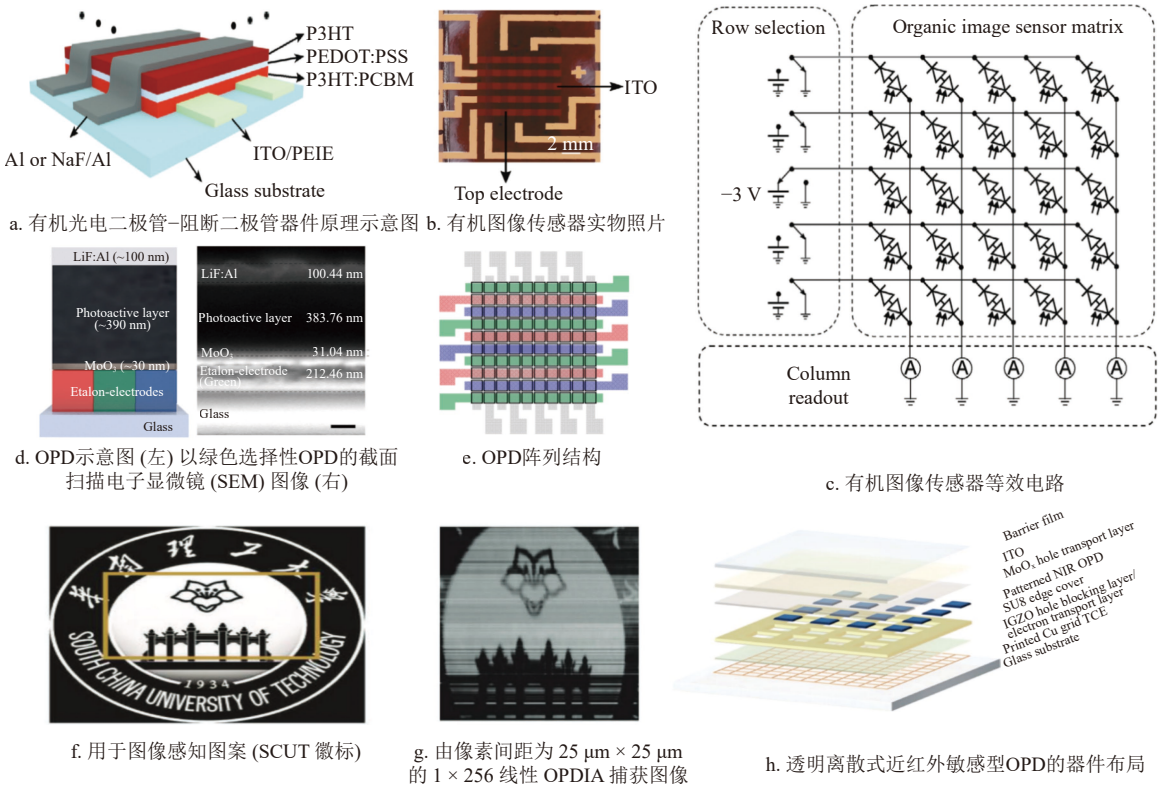
文献 [35] 的思路是让底电极同时承担电接触和光学滤色两种功能。不同厚度的 Ag 基 etalon 电极形成 R/G/B 窄带腔，而 P3HT、PTB7-Th 与 PCBM 构成约 400～770 nm 宽吸收三元本体异质结（BHJ），因而无须在 OPD 上另贴吸收式滤色片。10×10 阵列的像素与像素间距均为 500 μm，R/G/B 中心波长约为 650/550/450 nm，半峰全宽分别约 120/95/95 nm；图 3d 和图 3e 依次展示 OPD 示意图和绿色选择性 OPD 的截面扫描电子显微镜图像以及阵列构型。该设计把光谱选择前移到电极，有利于减小滤色片带来的光损失和工艺对准步骤。

文献 [36] 针对强背光下有机半导体迁移率受限导致的早期光电流饱和，在 P3HT 中加入 1 wt% 的 DAB 分子开关。弱光时开环 DAB 基本不改变肖特基 OPD，强光中闭环 DAB 逐渐成为激子分离与电子俘获中心，使器件可逆地转入光倍增模式，从而把最高可检测光强由 13.7 $mW \cdot cm^{-2}$ 扩展到 434 $mW \cdot cm^{-2}$；按文中 NEP 口径计算的 LDR 由 196 dB 增至 225 dB。作者进一步制备 96×96 阵列，像素和像素间距均为 100 μm，并在 434 $mW \cdot cm^{-2}$ 白光下恢复清晰星形边缘。该工作把非线性增益从“固定高增益”改成光强自适应。

文献 [33] 面向近红外线阵读出，将 Y6 作为第二受体引入 PTB7-Th:COTIC-4F，使约 30% Y6 补偿原有 p 型掺杂并降低陷阱密度，在保留近红外吸收的同时压低暗电流。器件覆盖约 300～1 100 nm，在 780～1 070 nm 保持较高探测率，并以 1 050 nm 完成成像；1×256 OPD 线阵的像素间距为 25 μm×25 μm，键合至 TI 模拟前端（AFE）2256 外部模拟前端形成扫描图像（图 3f、图 3g）。这一路线把材料掺杂补偿与成熟 ROIC 结合，显示无集成背板也可达到较小像素间距。

文献 [37] 从显示交互场景反推器件和阵列，而不是先追求单器件峰值。器件采用印刷 Cu 网格/铟镓锌氧化物（IGZO）/PCE-10:IEICO-4F/MoO_x/ITO 层叠，利用约 850 nm 近红外响应把可见透明与手势照明分开。16×16 个主像素中，每个主像素由 14×14 个并联子像素组成；子像素有效面积为 50 μm×50 μm、像素间距 240 μm，主像素总感光面积 0.49 mm^2、像素间距 6.24 mm。该分级像素结构用稀疏感光面积换取约 70% 的可见光透过率，再由外接 AD71124 读出和算法恢复位置。图 3h 器件布局图说明透明度来自网格电极、图案化有机层和透明顶电极的共同设计，场景图则证明阵列可直接置于笔记本显示器前完成无接触输入。

综合来看，无源 OPD 阵列的集成并非沿同一指标单调演进：阻塞二极管和光倍增路线以器件非线性换取选通或增益，彩色路线以腔电极或光图案化材料换取光谱通道，透明路线以分级子像素换取显示可见性，印刷、强背光、近红外线扫描和偏压可调路线则分别优化制造、动态范围、读出兼容和阵内计算。



a. 有机光电二极管−阻断二极管器件原理示意图 b. 有机图像传感器实物照片

d. OPD示意图 (左) 以绿色选择性OPD的截面扫描电子显微镜 (SEM) 图像 (右)

e. OPD阵列结构

c. 有机图像传感器等效电路

f. 用于图像感知图案 (SCUT 徽标)

g. 由像素间距为 25 μm × 25 μm 的 1 × 256 线性 OPDIA 捕获图像

h. 透明离散式近红外敏感型OPD的器件布局

图 3　无源阵列与外接读出集成

2.2　TFT 背板与有机感光层集成

无源矩阵通过交叉行列直接选择 OPD，元件少且适合印刷，但阵列电流会经过共享线路和未选器件，容易产生串扰、压降。随着行列数增加，每个像素可分配的积分和读取时间缩短，公共线寄生电容也限制速度。阻挡型或受阻输运器件可改善关断，却不能完全消除大阵列中的互连问题。因此，无源矩阵更适合较低分辨率、较慢扫描或对成本和柔性优先的场景[15, 19, 34]。有源矩阵在像素内利用 TFT 隔离探测器和数据线，使选中像素能够被独立积分与读出，并减小公共线路对暗态电流的影响。其代价是 TFT 关态漏电、阈值漂移、像素保持电容和扫描时序成为新的噪声来源[17, 38-39]。

TFT 有源矩阵在每个像素内配置选通晶体管，典型 OPD 像素由 TFT 控制感光二极管与数据线的连接，曝光或保持阶段 TFT 关断，读出阶段逐行导通，列端积分器再把电流或电荷转换为电压。三晶体管有源像素还可在像素内完成复位、源跟随放大与选通。与无源交叉阵列相比，这种结构能够隔离未选像素并支撑更大的行列数，但背板关态漏电、阈值电压与迁移率离散、数据线电阻电容、扫描占空比和 OPD 暗电流均会影响系统噪声与帧率预算。依据 TFT 沟道材料和制造逻辑，TFT 背板与有机感光层集成可分为非晶硅、IGZO/铟锌氧化

物（IZO）/铟锡锌氧化物（ITZO）、ZnO 透明 TFT、LTPS 和有机 TFT 这 5 类。

2.2.1 非晶硅 TFT 背板

非晶硅（a-Si）TFT 可直接借用成熟平板显示产线，以低成本、大面积均匀沉积和较低关态电流见长，适合逐行寻址以及中低帧率成像；其迁移率较低，难以在像素内布置复杂放大电路，柔性版本的印刷互连、版图缺陷和长数据线又会进一步限制速度与均匀性。该路线的研究思路因而从早期“把 BHJ 感光膜覆盖到柔性背板”逐步转向“以涂布、界面层和结构工程降低面板级暗电流与缺陷”，重点不是单个 OPD 的峰值探测率，而是把器件性能稳定地转移到整片阵列。

文献 [38] 首先在 PEN 上的氢化非晶硅（a-Si:H） TFT 背板集成约 4 μm 厚 MEH-PPV:PCBM（1:3）BHJ，采用 Cr 像素电极/BHJ/ITO 顶电极形成 180×180 柔性阵列，像素间距 340 μm（75 dpi）、填充率 76%。较厚 BHJ 可在抑制暗电流的同时借助外场收集光生载流子，488 nm 照明下的 EQE 约 35%；器件可在约 5 cm 曲率半径下工作，并获得大面积图像。该工作证明柔性有机前板可以与 a-Si 寻址结合，图像中的点、线缺陷主要来自印刷 TFT 与互连。文献 [40] 把喷涂工艺引入 256×256、98 μm 像素间距的 a-Si TFT 阵列，以 PV-D4650:PCBM（1:3）BHJ 和 ITO/TFB/BHJ/Al 正置结构实现可见光成像。其核心不是简单更换沉积方式，而是利用加工添加剂改善喷雾液滴铺展、膜面粗糙度与针孔，以约 10 000 个像素的统计分布检验暗电流和响应均匀性；优化后器件在约 660 nm 获得约 0.44 $A\cdot W^{-1}$ 响应度，并以 530 nm 光完成约 4.8 $frame\cdot s^{-1}$ 成像。由此可见，喷涂能扩展大面积制造，但应同时关注溶剂挥发、膜厚分布、残像与坏点率等指标。文献 [41] 进一步把界面工程用于 510×470 大面积 a-Si TFT 图像传感器：PCDTBT:PC71BM BHJ 厚约 850 nm，倒置 ITO/AZO/BHJ/$CuCrO_2$/Ag 结构以溶液法 p 型 $CuCrO_2$ 作为空穴传输层。$CuCrO_2$ 改善能级匹配并抑制反向暗电流，使器件覆盖约 300～800 nm、响应峰约 620 nm，像素间距 150 μm、有效区约 75 mm×81 mm，该研究在 510×470 阵列上获得 525 nm 线对图像，支持 $CuCrO_2$ 界面层在该器件结构中的应用。文献 [42] 则面向面板级后端集成，在第四代半显示产线 a-Si:H TFT 上构建 PM6/PDFC 双相异质结（BPHJ）。自组装单层提高 ITO 功函数并稳定下部供体富集区，上部 BHJ 负责激子分离，使 64×64、500 μm 像素的 OPD 阵列在保持可见—近红外吸收的同时，将读出暗电流降至皮安以下，并在 660 nm、最低约 4 $nW\cdot cm^{-2}$ 条件下恢复图案。图 4a、4b、4c 依次给出 OPD/a-Si:H TFT 垂直截面、OPD 阵列连接、无线读出和正常/弱光成像结果；相对常规 BHJ，SAM-BPHJ 器件在该 64×64 阵列中表现出约 3 个数量级暗电流下降。

a-Si:H TFT 背板集成的演进重点已由证明有机感光膜能够覆盖柔性 TFT，转向利用涂布、界面层和结构工程控制面板级暗电流、膜厚离散与坏点。

2.2.2 IGZO、IZO 与 ITZO 氧化物 TFT 背板

IGZO、IZO 和 ITZO 均属于金属氧化物 TFT。相较 a-Si:H，它们通常具有更高迁移率、更低关态电流和较小低频噪声，适合长积分、小像素间距和柔性面板，代价是氧空位、光致阈值漂移、钝化层与退火条件会改变晶体管稳定性，且玻璃或聚酰亚胺上的工艺窗口必须避开已完成 OPD 的热与等离子体耐受上限。该类工作的演进逻辑是从大面积间接 X 射线和掌纹面板，推进到 50 μm 像素间距 OPD 以及 40 μm 像素间距 3T 有源像素，读出也由单纯行选逐步增加像素内放大。

文献 [43] 在 25 μm PEN 基底的 IGZO TFT 背板上集成约 300 nm 专有 D-A 聚合物:PC61BM BHJ，并叠加闪烁体构成 120×160 间接 X 射线探测器；像素为 126 μm×126 μm、填充率约 50%。IGZO 迁移率约 15 $cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1}$、关态漏电低且阵列导通电流离散小，使器件可在约 10 $frame\cdot s^{-1}$ 下读取，并在低至约 3 $\mu Gy\cdot frame^{-1}$ 剂量下成像。该设计的关键是让约 550 nm 闪烁体发光与 OPD 吸收匹配，同时用柔性背板扩大探测面积；研究同时记录了辐照后的 TFT 阈值电压漂移与恢复，但还需关注器件的长期辐照寿命。文献 [44] 将约 300 nm 印刷聚合物:PCBM BHJ 覆盖在 IGZO TFT 有源矩阵上，形成 640×480、126 μm 像素、约 6 cm×8 cm 和 200 ppi 的掌纹扫描器。该工作以大板级涂布和生物识别作为目标，强调有机前板可在显示制造尺度获得宽可见响应并覆盖手掌，而非仅追求单个微小像素；大面积反射成像还会受到照明均匀性、手掌与传感面的光学间隙、横向串扰和寿命制约。它为后续更高分辨指纹阵列提供了面积与制造基础。文献 [45] 以双栅自对准 a-IGZO TFT 背板和狭缝涂布约 280 nm PCDTBT:PCBM BHJ，构成 640×480、

约 50 μm 像素间距（508 ppi）、3.2 cm×2.4 cm 的反射式指纹传感器。倒置 MoCr/IGZO 底电极/BHJ/MoO_x/Ag 堆叠利用 IGZO 电子传输界面和 MoO_x 顶电极降低暗电流至约 10^{-7} mA·cm^{-2} 量级，使高分辨阵列兼顾可印刷前板与面板背板。其研究思路是用自对准 TFT 压缩版图寄生，再用连续涂布覆盖大面积，但指纹图像仍需结合像素串扰、照明路径、坏点校正和阵列分布判断，不能由像素间距单独推断有效分辨率。文献 [17] 在玻璃 IZO TFT 背板上制作 P3HT:PCBM（1:1、约 180 nm）正置 OPD，得到 256×256、50 μm 像素间距阵列，单像素有效感光面积 1 155 μm^2。IZO TFT 漏电低至约 5×10^{-14} A，OPD 在约 500 nm 处 EQE 峰值 33.5%；图 4d、4e 从 TFT 阵列显微照片和 OPD 传感器截面结构图说明系统的工作方式：OPD 阳极连接 TFT 漏极，行选后像素电荷进入列线与反馈电容积分器，复位、漏电采样和信号采样通过 IRST、SHR 和 SHS 时序分离，以两次采样削弱偏置及低频噪声。该图同时揭示噪声由 OPD 暗电流、TFT 关态漏电、数据线寄生和读出 IC 输入噪声共同构成。文献 [46] 采用 15 μm 聚酰亚胺上的 ITZO TFT，将 SubPc:未披露掺杂组分（3:1）的绿色选择性有机光导膜集成进 3T 有源像素，形成 320×240（QVGA）、40 μm 像素间距的柔性阵列。相较 1T 无源积分像素，3T 结构在像素内加入复位与放大，可提高读出增益并减轻长列线负载；ITZO 迁移率约 17 cm^2·V^{-1}·s^{-1}，而薄化与剥离后的总厚度约 76 μm，显示其面向可贴合传感。需要注意的是 TFT 活化仍涉及约 300 ℃ 步骤，论文图像主要在从载板剥离前验证，且受体/掺杂材料未公开，因此还需关注器件柔性状态下的长期漂移、弯折后噪声及材料复现性。

IGZO、IZO 和 ITZO TFT 集成路线由大面积柔性 X 射线或掌纹面板推进到 50 μm 级像素和带像素内放大的 3T 结构，并且在追求低漏电流和高迁移率的同时扩展面积与像素密度。当前研究重点关注阈值稳定、低温工艺兼容、阵列噪声分解及柔性状态下的长期一致性。

2.2.3　ZnO 透明 TFT 背板

ZnO 也是氧化物半导体，但这里单列，是因为两项工作并非以更小像素间距为主要目标，而是利用其约 3.3 eV 宽带隙和可见光透明性，把 TFT 读出层夹在多个颜色选择有机膜之间。其研究思路是以垂直叠层让同一横向坐标同时采集不同波段，从而避免 Bayer 滤色片造成的空间采样损失，对应的集成难点转为上层透过率、层间绝缘、透明互连、逐层加工损伤和各色通道增益匹配。

文献 [47] 制作了一种由绿色（G）和红色（R）敏感有机光导膜组成的垂直堆叠式图像传感器，每层有机光导膜均配备一个薄膜晶体管，该晶体管利用透明 ZnO 沟道来读出有机膜中产生的信号。ZnO-TFT 电路的有效像素数为 1 410（47 × 30），其间距为 600 μm。图 4f、图 4g 分别给出单列电路和器件垂直截面，入射光穿过透明 ZnO-TFT 后被相应有机层吸收，积累电荷在行选 TFT 导通时送至列线，再由外接列选晶体管和移位寄存器读出。该方案在电视帧率下获得与 1 410 个读出像素对应的双色图像，提供了透明 ZnO-TFT 读出与两层有机感光膜空间共址的证据；但金属栅线仍遮光，绿色与红色层的光电流量级不同，层间基板和外接硅移位寄存器也尚未实现完全单片化。在垂直堆叠式图像传感器中，需要注意光谱串扰，尤其是 OPD 对于不同波段的响应率和一致性问题[48]。

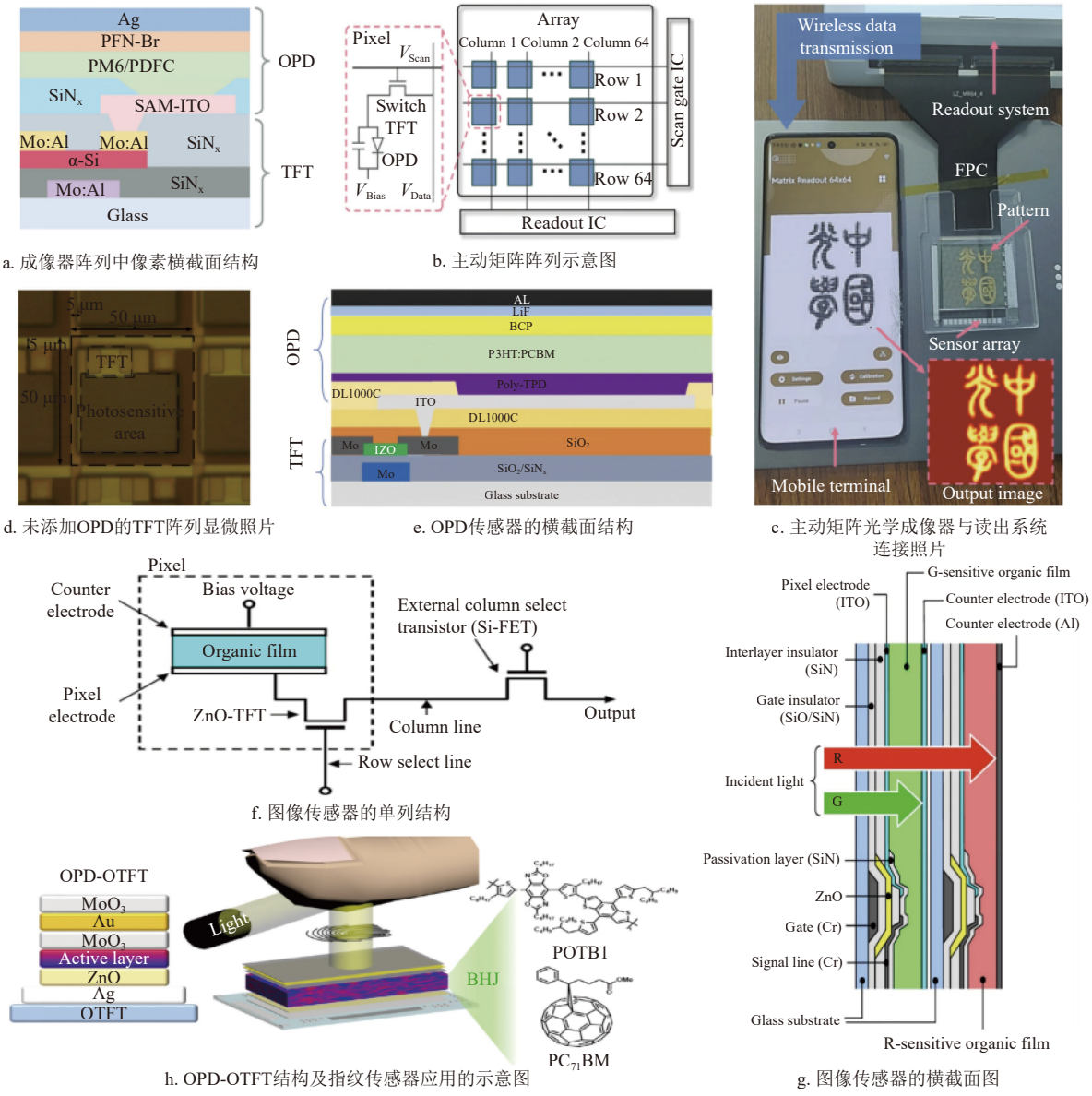
ZnO 透明 TFT 集成路线并未以缩小像素为主，而是把透明寻址平面嵌入多层有机感光膜，实现同一位置的多波段采样。

2.2.4　LTPS TFT 背板

低温多晶硅（low temperature poly-silicon, LTPS）TFT 的迁移率通常显著高于 a-Si:H 和多数氧化物 TFT，可在较小像素内配置 CMOS 式晶体管、栅极驱动和更高速外围电路，适合高像素密度生物识别。同时，激光结晶带来的晶粒与阈值离散、较高热预算、表面台阶及柔性基底转移会增加均匀性和成本。

文献 [49] 将 PMDPP3T 或 STD-001:PC61BM 近红外 BHJ 覆盖在柔性 LTPS 有源矩阵上，构成 252×256、50 μm 像素间距（508 ppi）、约 12.6 mm× 12.8 mm 的 15 μm 厚可贴合成像器。LTPS 可同时提供约 40 cm^2·V^{-1}·s^{-1} 迁移率的 NMOS/PMOS 器件并连接模拟前端，阵列以约 850 nm 响应完成指纹、静脉和空间光电容积描（PPG）成像，贴合皮肤可减小光学间隙。论文同时报告满阵列约 4.4 frame·s^{-1} 的高分辨读取和较快低分辨模式，说明高迁移率并不等于高帧率，列数、AFE 带宽和功耗仍需共同设计。文献 [50] 把 P3HT:PC71BM（100:3）供体富集光倍增型 OPD 与 LTPS 背板结合，并以 PTAA 辅助层及紫外处理改善空穴传输，形成 134×134、75 μm 像素（约 338 ppi）、10.05 mm×

10.05 mm 指纹矩阵，感光占比 68.2%。光倍增机制在较高反向偏压下把弱反射信号放大，文中给出最高约 51 400 的信噪比并在 127 lx 环境下得到指纹图像；LTPS 栅极驱动与读出接口则负责高密度寻址。该路线以器件内部增益补偿较小像素的光子预算，但比较时应同时给出偏压、光强、增益带宽、残像和像素分布，避免把单一高 SNR 直接等同于低功耗、高速系统性能。



a. 成像器阵列中像素横截面结构　b. 主动矩阵阵列示意图

d. 未添加OPD的TFT阵列显微照片　e. OPD传感器的横截面结构　c. 主动矩阵光学成像器与读出系统连接照片

f. 图像传感器的单列结构

h. OPD-OTFT结构及指纹传感器应用的示意图　g. 图像传感器的横截面图

图 4　TFT 背板与有机感光层集成

LTPS TFT 集成路线从高迁移率背板的柔性生物识别扩展到光倍增弱光指纹，核心是用更复杂的像素和外围电路支撑较高像素密度。研究重点不再只是 TFT 速度，而是晶粒离散、光倍增偏压与残像、读出带宽和功耗的协同。

2.2.5　有机 TFT 背板

有机 TFT 背板可与 OPD 共享低温、柔性和溶液加工平台，材料模量与塑料基底更匹配，适合大面积贴合成像。其核心约束是溶剂正交性、栅介质交联和阻隔、接触电阻、阈值漂移以及 OPD 后续工艺对下层晶体管的影响。当阵列扩大时，涂布膜厚梯度、线阻和坏点会迅速放大。因此有机薄膜晶体管（OTFT）路线从层压式分立薄片发展到垂直单片堆叠，再以低温连续涂布和分子设计同时提升面积、分辨率与光谱范围。

文献 [51] 将 72×72 pentacene 有机场效应晶体管（OFET）有源矩阵与独立制备的 ITO/CuPc/PTCDI/Au PHJ 光电二极管薄片层压，并以银浆通

孔连接，得到 50 mm×50 mm 传感区、700 μm 像素间距（36 dpi）、450 μm×450 μm 感光面积的大面积柔性扫描器。分层制造可避免 OPD 溶剂直接损伤 OFET，是早期“先分别优化、再机械集成”的路线；同时，层压对准、银浆通孔和晶体管良率造成的点线缺陷限制了分辨率与一致性。文献 [52] 采用可光刻交联栅介质和钝化层，使 OTFT 背板能够承受后续有机小分子 OPD 沉积与标准图形化，在 32×32 阵列上比较 1 mm、300 μm 和 200 μm 多种像素间距。SubPc/C60 PHJ 覆盖约 300～650 nm，像素电极/MoO_3/SubPc/C60/BCP/Ag 正置结构采用半透明顶电极完成顶照成像。该工作的重点是用可交联介质建立工艺正交性并检验版图缩放，而非追求最大阵列数；像素间距缩小时 TFT、互连和通孔占比增加，填充率、列寄生及图形化缺陷成为新的限制。文献 [53] 把倒置 P3HT:PCBM OPD 垂直堆叠在低温溶液加工的 OTFT 上，OPD 最高工艺温度 85 ℃、整套背板约 100 ℃，避免破坏下层有机半导体与聚合物介质。刀涂和低温界面处理将阵列扩展至 1 536×1 536、85 μm 像素（约 300 ppi）和约 130 mm×130 mm 有效区。OPD 通过层间介质与通孔连接，前照半透明电极则在导电性和透过率之间折中，其研究思路是优先建立大面积制造窗口，但面板级膜厚梯度、OTFT 迁移率/阈值分布、长线 RC 和外接芯片贴装仍决定最终像质与帧率。文献 [54] 从药物中间体构建噻唑并噻唑共轭聚合物，通过侧链调节溶解性、分子取向与 PBTTzC3:Y6 共混形貌，将倒置 Ag/ZnO/BHJ/MoO_3/Au OPD 集成到同一 318 ppi OTFT 平台。512×256 阵列采用 80 μm 像素、约 41 mm×21 mm 有效区，光谱覆盖约 400～900 nm，并以 810 nm 获得近红外指纹图像。该工作说明 OTFT 背板可以复用，而感光材料设计决定任务波段；全色/近红外吸收虽扩大应用范围，也会引入暗电流、环境光和光谱串扰之间的权衡。文献 [55] 在相同 512×256、80 μm 像素（318 ppi）平台上，以苯并双噁唑聚合物 POTB1 和 PC71BM（1:1.2）构建约 400～700 nm 可见光 BHJ。直链辛基噻吩间隔基在提高溶解性的同时增强 π-π 堆积并优化共混形貌，使 OPD 获得较低暗电流和较高响应；下层顶栅底接触 OTFT 漏电低于 10 fA、开关比超过 10^7，为感光层提供稳定选通。图 4h 为 OPD-OTFT 的结构以及应用示意图；与文献 [54] 的工作相比，它面向 530 nm 可见反射指纹，而不是 810 nm 近红外。

OTFT 集成路线由低温垂直单片集成到大面积阵列，演进主线是建立感光层、介质和晶体管之间的工艺兼容性，再通过材料设计切换可见与近红外波段。当前的研究瓶颈仍是面内膜厚与阈值分布、长线 RC、封装和芯片贴装良率，而非单个 OPD 的峰值性能。

总体而言，TFT 集成路线由有机感光层能否被逐行寻址转向背板材料能否在目标面积和像素间距下维持低漏电、均匀性和稳定读出。具体来说，a-Si:H TFT 侧重成熟产线与面积，氧化物 TFT 支持低漏电小像素间距，ZnO 透明 TFT 服务垂直彩色，LTPS 支撑复杂像素，OTFT 侧重低温柔性。

2.3　CMOS/ROIC 与有机感光层集成

CMOS/ROIC 集成路线把有机感光层的光谱可设计性、强吸收和低温薄膜工艺，与硅电路的小像素、高速扫描、低噪声模拟前端及片上处理能力结合。与 TFT 有源矩阵相比，CMOS 像素不仅承担行列寻址，还可在像素内完成复位、积分、电荷—电压转换、缓冲、增益切换和全局快门；相应地，有机材料及其沉积、图形化和电极工艺必须适应 CMOS/ROIC 后端的平坦化、热预算和供电电压。按照有机感光层与 CMOS 读出节点之间是否增加独立储荷、受控电荷转移、材料记忆或可单独寻址的薄膜有源平面，可将该路线分为两个集成层级：一是把有机感光层直接形成于 CMOS/ROIC 顶层，使光生信号经像素电极进入硅像素，并由 CMOS 完成积分与读出；二是在有机探测层与 CMOS 之间引入薄膜光栅、记忆节点或独立 TFT 有源平面，改变信号进入 CMOS 之前的存储、转移或处理过程。

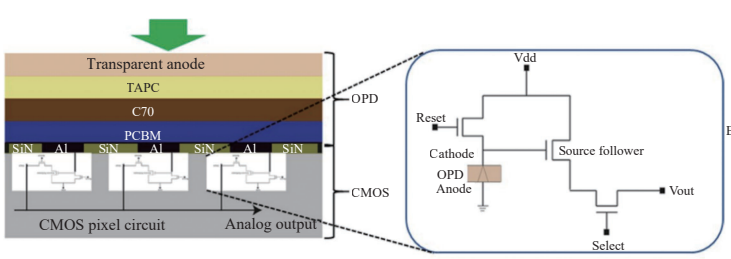
2.3.1　CMOS/ROIC 上有机感光层直接集成

直接集成是在完成的 CMOS/ROIC 顶层形成像素电极和互连通孔，再构建有机光电转换层及公共透明电极。有机层吸收入射光后产生的电流或电荷变化经像素底电极耦合至 CMOS 输入节点，CMOS 负责扫描、复位、积分、电荷—电压转换、信号放大；公共顶电极则提供有机层工作偏压，并可在特定像素中参与灵敏度或曝光控制。

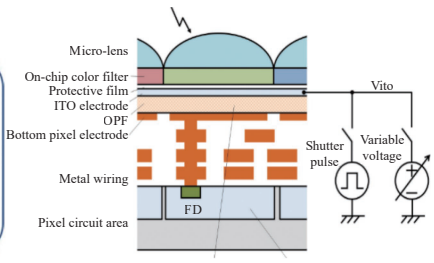
直接集成首先需要建立完整而稳定的电流传输路径。光生载流子必须经过选择性接触和像素底电极进入 CMOS 积分节点，因而电极功函数、载流子阻挡层和界面缺陷共同决定注入暗电流及电荷提取效率；有机层电容、像素节点电容、工作偏压和积分时间又共同决定转换增益、满阱容量与动态范

围。与此同时，CMOS/ROIC 后端的表面台阶、钝化层耐溶剂性、薄膜连续性和公共顶电极片电阻会影响阵列均匀性与横向串扰。这里的电流传输路径不仅是有机层与金属电极能否导通，还包括光生信号以何种形式进入 CMOS、由哪个节点积分，以及偏压、复位、储荷和读出时序能否协同工作。早期研究首先验证了这种电学耦合的可行性。2005 年的有机光导膜覆盖 CMOS 工作建立了“上层感光、下层处理”的垂直分工[56]。文献 [57] 以商业 0.35 μm CMOS 无源像素芯片为底板，将 P3HT:PCBM 体异质结喷涂于整片像素区，并以 PEDOT:PSS 形成透明顶电极；30×30 阵列像素间距为 30 μm、像素电极为 15 μm，加入 SQ 染料后响应由约 350～650 nm 扩展至近红外。该工作表明低温溶液工艺可以跨越 CMOS 像素金属区完成直接覆盖，同时也揭示了膜厚、顶电极电阻、横向输运和钝化层耐溶剂性对输出的影响。文献 [4] 随后以真空沉积 TAPC/C70 平面异质结覆盖商业 0.18 μm CMOS，并通过掺杂 PCBM 缓冲层改善有机层与铝像素电极的电子连接，图 5a 为基于 3T 有源像素架构的图像传感器像素电路。像素数量为 17×13 的阵列在 500～525 nm 完成成像，像素灵敏度约 2 V·(lx·s)$^{-1}$、动态范围为 71 dB。文献 [25] 采用高、低灵敏度单元同时曝光，并结合高介电常数存储电容和电容耦合噪声消除器，使 970×550、6 μm 像素原型实现 123.8 dB 同时捕获动态范围、600 ke$^-$满阱、1.6 e$^-$复位噪声和 60 frame·s^{-1} 读出。同年，文献 [58] 利用有机层转换效率随顶电极电压开启或关闭的阈值特性控制曝光，并配合像素内增益切换，使 1 920×1 080、3 μm 像素阵列实现光电转换控制全局快门和 210 ke$^-$饱和信号，传感器横截面示意图如图 5b。文献 [28] 进一步利用两层有机膜的电阻比和载流子抽取阈值，在同一偏压端与读出链上切换可见和红外模式，实现 1 920×1 080、3 μm 像素的 2.1 MP RGB-IR 成像；其红外响应约为 700～940 nm，但温度、膜厚和老化引起的分压变化也增加了跨模式校准负担。随后，8K4K 系统把有机层偏压控制与像素内噪声消除、高电容储荷和多线并行读出结合，在 3 μm 像素下达到 8 192×4 320、60 frame·s^{-1} 和 450 ke$^-$饱和信号[20]；实时紫外系统则将有机感光层、1 880×1 400、0.9 μm CMOS 像素、全局快门和光学滤波联合用于氢焰与电晕成像[59]。

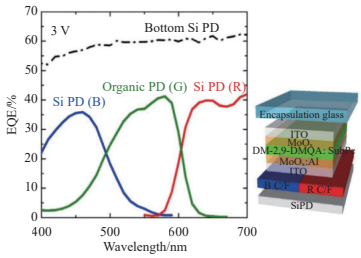
直接覆盖 CMOS 的有机层还构成像素的光谱调控界面，其选择吸收和非目标波段透过可以重构颜色及多波段信息。文献 [60] 以窄带喹吖啶酮感光层覆盖 CMOS3T 像素，制备 120×160、20 μm 像素的绿色传感器，建立上层选择吸收、下层完成电荷处理的基本结构。文献 [61] 随后在 228×248、18 μm 像素平台上构建有机层/Si 双色堆叠，利用绿色有机层吸收目标波段并透过蓝、红光，同时证明载流子阻挡层对于抑制偏置条件下的电极注入暗电流至关重要。文献 [62] 采用 DM-2,9-DMQA:SubPc 共蒸发体异质结覆盖仅保留蓝、红滤色通道的 CMOS，在 546 nm 获得约 60 nm 半峰全宽（图 5c），系统达到 5 MP 和 1.4 μm 像素，图 5d 为由绿色 OPD 像素组成的混合 CMOS 彩色图像传感器阵列的截面透射电子显微镜和扫描电子显微镜图像，并获得真实全彩图像（图 5e）[62]；文献 [63] 以 M4:C60 窄带感光层在相同像素尺度实现约 547 nm 中心波长和约 97 nm 外量子效率半峰全宽。在此基础上，垂直光路由单一选择通道扩展到同一空间位置的多波段采样。文献 [64] 则将可见透明 TzNβ:C60 紫外选择感光层直接覆盖商用 4T CMOS，使上层在约 300～400 nm 响应、下层硅继续采集可见图像；有效阵列为 64×120、像素间距 8.1 μm，文中 11×11 像素仅用于均匀性抽样。这些工作说明，有机层在直接集成中既承担光电转换，也承担位于硅像素上方的光谱分配功能。



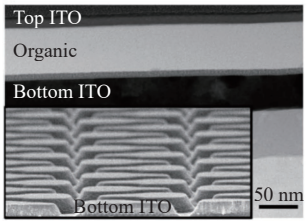
a. 基于3 T有源像素架构的图像传感器像素电路[4]



b. 图像传感器横截面示意图[58]



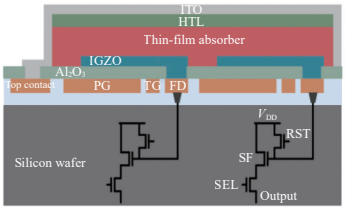
c. B、G和R光电二极管的等效量子效率(EQE) 曲线[62]



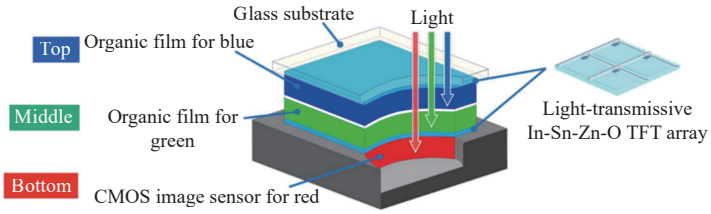
d. 混合 CMOS 彩色图像传感器阵列截面透射电子显微镜 (TEM) 和扫描电子显微镜 (SEM，插图) 图像



e. 有机-硅混合CMOS彩色图像传感器相机拍摄的全彩图像



f. 薄膜PPD像素结构[16]



g. 三层堆叠式图像传感器示意图[27]

图 5　CMOS/ROIC 与有机感光层集成

总体而言，CMOS/ROIC 上有机感光层直接集成沿两个维度演进：电流传输上由基本光电流输入发展到低暗电流接触、像素储荷与噪声控制，再到偏压控制的快门和模式切换；光谱调控上则由宽谱感光发展到窄带选择、垂直颜色分离及 UV/可见或 RGB/IR 多波段集成。

2.3.2　CMOS/ROIC 上功能化薄膜像素集成

功能化薄膜像素不再让有机感光层仅作为向 CMOS 输出光电流的前端，而是在有机探测层与硅读出之间增加可控电荷转移节点、材料状态存储或能够独立寻址的 TFT 有源平面。其共同特征是改变信号进入 CMOS 之前的处理过程：光生电荷可以先在薄膜光栅中积分后受控转移，不同光谱层可以由独立 TFT 平面分别寻址，或者曝光历史可以保存在有机陷阱中并由 ROIC 读取。

文献 [16] 把硅钉扎光电二极管的“复位后完全耗尽—转移栅读出”逻辑迁移到薄膜探测器，图 5f 为器件的像素结构横截面图。有机 BHJ 与 IGZO 光栅共同构成光生电荷积分节点，曝光期间电子先存储在薄膜光栅中，读出时再经 IGZO 转移栅送入 CMOS 浮动扩散节点，由后者完成电荷—电压转换和 4T 读出。64×64 阵列像素间距 5 μm，覆盖可见至 1 000 nm，在 940 nm 获得 54% 量子效率和 6.1 e^-读出噪声；相较传统 3T 薄膜像素，暗读噪声降低约两个数量级，并减轻 kTC 噪声与残像。这里的 IGZO 器件是像素内电荷转移层而非独立 TFT 背板，其创新在于引入 IGZO 光栅把 OPD 接入成熟低噪声读出电路。

与上述单一 CMOS 读出平面不同，文献 [27] 构建了能够分别寻址的透明 TFT/有机光导膜（OPF）平面和硅 CMOS 平面。如图 5g 所示，三层堆叠式图像传感器的上层蓝光选择 DPh-DNTT 单组分 OPF 连接 ITZO TFT，中层绿光选择 QA:DCV3T（1:1）BHJ 连接另一 ITZO TFT 平面，下层红光 Si 光电二极管由 CMOS 读取。蓝、绿响应峰分别约 420nm 和 550 nm，三层覆盖约 400～700 nm，系统为 320×240、20 μm 像素间距。不同光谱层可独立设置材料、偏压和读出节点，并在同一横向坐标完成 RGB 采样，从而避免 Bayer 插值造成的空间分辨率损失，代价是透明 TFT、电极和基底造成累计光损失，多衬底对准、层间反射、互连数量和三通道增益校正也限制像素进一步缩小。这一结构应与薄膜钉扎像素区分，前者增加的是完整、可独立寻址的有源读出平面，后者增加的只是单个像素中的电荷转移器件。

文献 [65] 将 PTB7-Th:PZ1 全聚合物 BHJ 制成横向两端子器件，以 MPTS 界面陷阱调节光生载流子滞留，并通过非破坏性 CMOS 兼容光刻将普通和突触型像素共同图形化到 640×512、15 μm 像素间距的 ROIC 上。普通模式读取实时光分布，突触模式则利用约 10^1～10^4 ms 可调记忆时间生成亮度历史和运动轨迹。与钉扎像素保存并完整转移曝光电荷不同，该方案把历史状态编码为有机层中的陷阱占据和电导变化，CMOS 负责读取状态相关电流，其目标由降低传统图像读出噪声转向焦平面时

间信息提取[65]。

3 种功能化方案分别改变了不同的集成环节：薄膜钉扎像素改变电荷的存储与转移路径，多有源平面堆叠改变不同光谱层的寻址归属，感存算像素则改变信号的状态表达与处理位置。CMOS 背板上的功能化薄膜像素集成通过增加功能节点或有源平面获得低噪声转移、同位多光谱或时间记忆能力，同时也引入更严格的薄膜一致性、层间工艺及可靠性要求。

集成路线的选择应由需求决定：若首要目标是低成本、快速验证新材料或透明与可印刷，且阵列规模和帧率要求有限，可优先采用无集成背板或外接读出；若要求大面积、机械柔性、可贴合以及中等像素密度，TFT 有源矩阵则更合适，背板材料再按读出速度、透明性、工艺温度与成本来选择 a-Si:H、氧化物、LTPS 或 OTFT；若要求微米级像素、高帧率、低噪声、宽动态或片上处理，则应选择 CMOS/ROIC，但需关注晶圆后端兼容、平坦化、良率和成本。光谱灵活性并非某一路线独占：早期材料筛选可先在无源阵列验证，可制造的大面积多波段系统倾向 TFT，精细光谱分层、模式切换和感存算则更依赖 CMOS/ROIC。

表 2 为 3 类有机图像传感器集成路线比较。

表 2　3 类有机图像传感器集成路线比较

集成路线	典型像素	可扩展规模	读出与扫描	工艺特点	核心优势	主要问题	参考文献
无集成背板/外接读出	交叉阵列、阻挡二极管、两端子倍增型有机光电探测器（PM-OPD）、透明阵列	单元至小/中规模阵列；线阵可外接多通道AFE	行列复用或外接TIA/ROIC，系统布线负担高	可全印刷、低温、大面积、透明	结构简单；透明/柔性；快速验证新材料	串扰、线阻、扫描速度、外接电路体积	[13-14, 33-34, 37]
TFT 有源矩阵	1T1OPD、3T有源像素、OTFT-OPD垂直集成	大面积中高分辨率；最高示例1 536×1 536	逐行寻址，外围AFE/ADC；迁移率与线阻限制速度	玻璃/塑料基底；低温涂布、印刷或面板工艺	大面积、柔性、贴合、较高填充率	TFT漂移、膜厚均匀性、坏点、封装和校准	[17, 38, 42, 49, 53]
硅 CMOS/ROIC	OPF/OPD-over-CMOS、钉扎薄膜像素、全局快门	从原型到百万/8K4K 像素	像素内复位/转移/放大，列ADC和高速接口成熟	后端兼容温度、平坦化、溶剂和顶电极	小像素、高速、低噪声、高动态范围	晶圆兼容、均匀性、良率、成本	[16, 20, 56, 62, 64]

3　有机图像传感器的应用

在前述无源阵列、TFT 有源矩阵及 CMOS/ROIC 异质集成路线的基础上，本章从成像波长出发，讨论有机图像传感器的应用。可见光与彩色成像体现了有机图像传感器从单色阵列、大面积柔性成像向高分辨率生物识别、窄带选色、无滤色片全彩及功能成像的发展；近红外成像及其向短波红外的延伸主要面向指纹、静脉、脉搏波、腕部血管和透明交互等任务，重点关注弱信号探测、低暗电流、组织贴合与高密度读出之间的协同；紫外成像强调在复杂背景下实现光谱选择、弱信号读取、快速曝光及长期稳定工作；X 射线间接成像则依赖闪烁体、有机感光阵列和大面积 TFT 背板之间的转换与耦合。

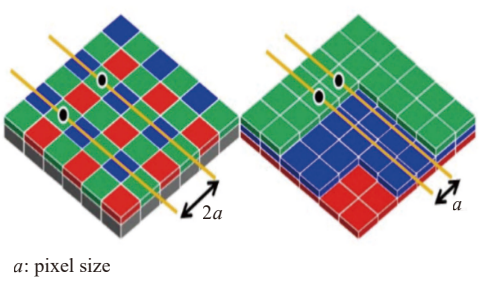
3.1　可见光与彩色成像

可见光成像既包括单色阵列、反射式生物识别和大面积柔性成像，也包括窄带选色、无滤色片全彩和具有动态调节或时间记忆的功能成像。对单色系统而言，应把材料响应转化为具有足够空间分辨率、均匀性和帧率的二维图像；对彩色系统而言，还需要在 R/G/B 通道之间平衡中心波长、半峰宽、透过率、串扰和读出同步。

文献 [66] 通过把有机光导膜引入 CMOS 后端互连层实现 0.9 μm 像素，表明垂直感光可把感光面积与硅平面电路进一步解耦，为后续小像素彩色和特殊波段集成建立了工艺基础。文献 [67] 提出 2.0 μm 像素的三层结构，以绿色 OPF 配合不同深度的蓝、红硅光电二极管进行无滤色片彩色采集（图 6a）。该方案的研究重点不只是增加一层有机膜，而是通过像素内通孔和垂直转移结构把三层电荷分别送入读出节点，减少传统 Bayer 插值造成的空间分辨率损失，传感器的堆叠结构和截面图分别如图 6b、图 6c 所示。图 6d 为三层堆叠式图像传感器的拍摄图像。

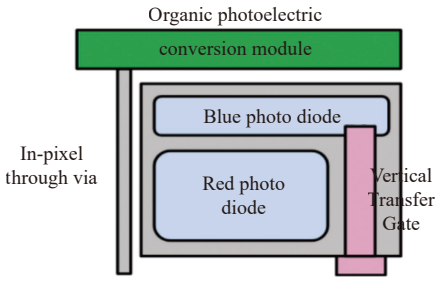
与硅上堆叠同期，无背板彩色阵列探索了更灵活的选色方式。文献 [68] 把“颜色材料、增益机制和像素图案化”合并到同一光化学步骤。F8T2、P3HT 和 PTB7-Th 分别提供蓝、绿、红选择性，4Bx 全氟芳烃交联剂经曝光后既固定图案，又通过界面带弯曲引发激子劈裂和电子俘获，在无传统受体的条件下形成光倍增型 OPD。原文给出的器件

为倒置 ITO/ZnO/给体:4Bx/MoO_3/Ag 结构，并制成 10×10 Bayer 型 B/G/R 无源阵列。该路线避免多种受体相分离造成的热不稳定，并把全溶液多色图案化推进到阵列。

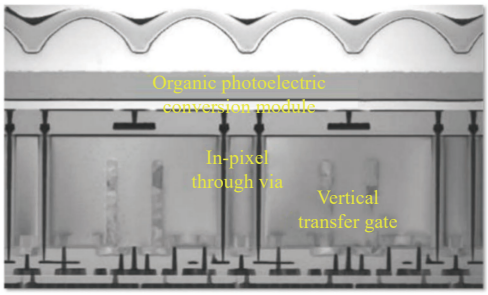


a: pixel size

a. 拜耳式（左） 与三层堆叠式（右） 图像传感器布局对比



b. 三层堆叠式图像传感器



c. 像素横截面图



d. 三层堆叠式图像传感器拍摄图像

图 6　有机图像传感器应用于彩色成像

机器视觉进一步要求感光层在彩色成像之外承担状态调制或记忆功能。文献 [69] 进一步把两端子像素用于阵内计算。对称 TAPC/C_{70}/TAPC 双平面异质结（PHJ）通过偏压极性和幅值改变上下结的载流子收集贡献，使单个器件的响应度可连续调谐并作为权重。4×4 阵列采用 2 mm×2 mm 有效面积、4 mm 像素间距，在 405、467 和 535 nm 下生成可重构光电流图，并演示卷积核操作。其创新是用偏压编码替代额外滤色或多晶体管权重单元，但当前阵列规模和像素尺寸仍属概念验证。

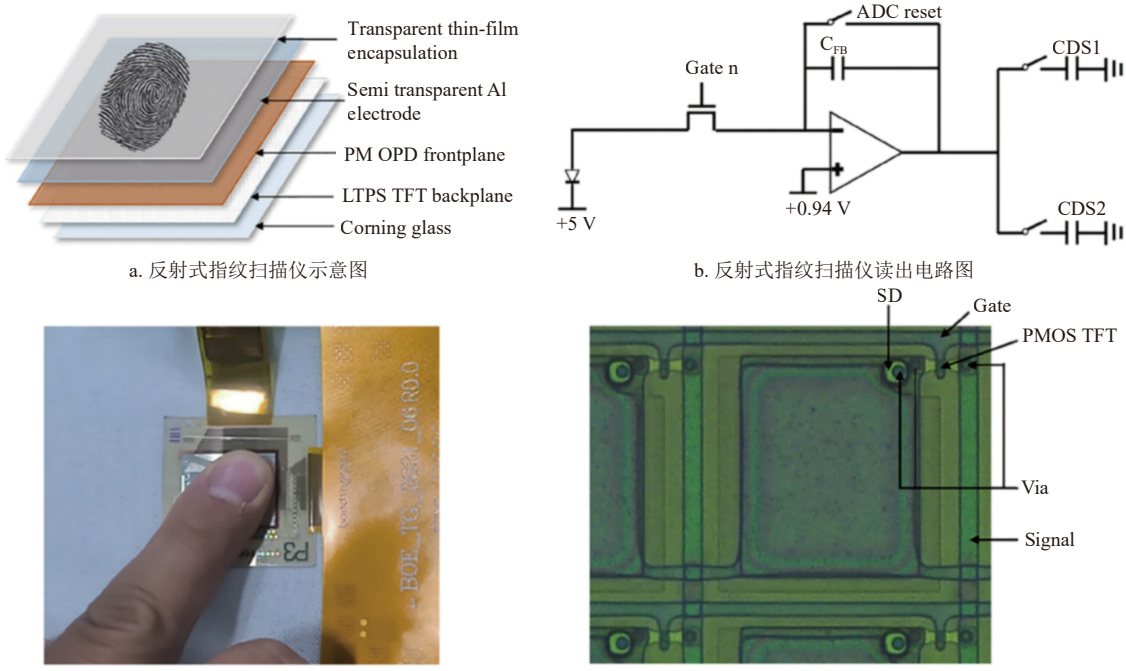
有机图像传感器可见光波段成像的主要瓶颈是在像素缩小后同时维持窄带选择性、量子效率、通道隔离和阵列一致性：光敏层和垂直堆叠都可能增加光损失、串扰或层间校准负担。现有功能成像仍多停留在小阵列验证，下一步应在高像素密度下用统一的色彩误差、PRNU、DSNU、串扰和帧率指标比较滤色、无滤色片堆叠与可调响应方案。

3.2　近红外成像

近红外成像利用近红外光在皮肤、血液和部分材料中的吸收与散射差异，适合指纹、静脉、脉搏波、腕部血管及透明显示前置交互。与可见光相比，该波段通常面临更低光生电流和更高背景噪声。柔性 TFT 能够改善皮肤贴合和大面积覆盖，CMOS/ROIC 适合高密度低噪声读出，无源透明阵列则以较大的像素间距换取显示兼容性；这些路线分别优化生物界面、空间分辨率和可见透过率[70]。

文献 [50] 采用 P3HT:PC71BM 供体富集光倍增层和 PTAA 辅助层，在 LTPS 背板上实现 134×134、75 μm 像素、约 338 ppi 的指纹矩阵（如图 7a）。如图 7b 所示，该检测系统包括 PM-OPD 阵列，该阵列与采用 LTPS TFT 的有源矩阵背板耦合，以实现数据读出。器件的封装工艺与平板显示器的生产线兼容，图 7c 展示了传感器照片，用于采集指纹数据。如图 7d 所示，在每个像素（75 μm×75 μm）中，有效感光占比为 68.2%，特定测试条件下给出的信噪比达到 51 400，可以在低亮度的光源下获得清晰的图像。该路线以内部光倍增弥补较大像素和反射损耗，适合弱光指纹读取，但高增益会同时放大陷阱记忆、偏压依赖和速度约束，跨系统比较时需回到照度、积分时间和带宽上。

有机图像传感器近红外波段成像的瓶颈是器件的暗电流、增益与响应速度：通过陷阱获得高光倍增可提高弱反射信号，却会增加偏压、残像和带宽代价；柔性贴合、透明度或小像素也分别牺牲读出复杂度、感光面积和节点容量。



a. 反射式指纹扫描仪示意图　b. 反射式指纹扫描仪读出电路图

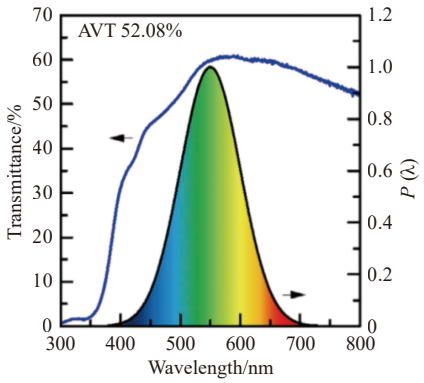
c. 反射式指纹扫描仪实物图　d. 传感器阵列照片

图 7　有机图像传感器应用于近红外成像

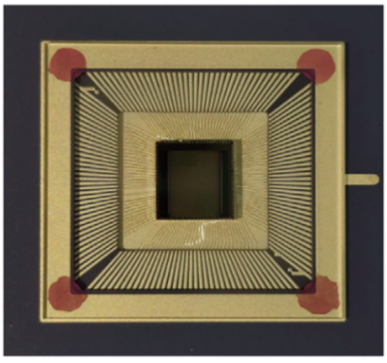
3.3　紫外成像

紫外成像主要面向氢焰、放电和材料检测等场景，其系统矛盾不是单纯提高紫外响应，而是在强可见背景下保持足够的 UV 选择性、弱信号 SNR 和时间分辨率。硅 CMOS 具有小像素、高速扫描和成熟全局快门，但普通有机感光膜可能同时响应可见光；因此，宽谱 OPF 配合滤光和读出控制，以及分子设计获得本征 UV 选择性，构成两种不同路线。

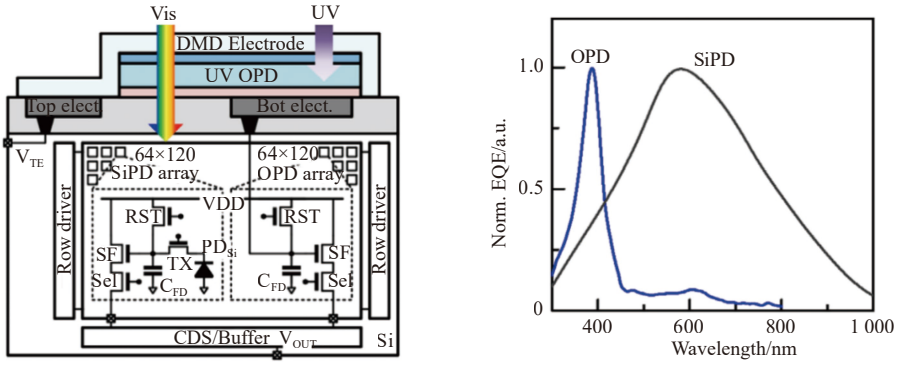
文献 [64] 以 TzNβ:C60 共蒸发 BHJ 形成约 300～400 nm 选择性 UV-OPD，并无缝覆盖商用硅图像传感器，得到 64×120 有效阵列和 8.1 μm 像素间距；中心波长约 385 nm、半峰宽约 60 nm。图 8a 展示了 UV-OPD 的透射光谱，并附有人眼的光视响应曲线。该器件表现出高光学透明度，平均可见光透射率为 52.08%。透射率峰值出现在 500～600 nm 波长范围内，与人眼视觉敏感度最高的区域高度吻合，因此该器件特别适合与商用 CMOS 图像传感器（CIS）集成，集成式 CIS 的照片如图 8b 所示。包括硅读出集成电路在内的完整系统架构如图 8c 所示。该 ROIC 由基于四晶体管有源像素传感器（4T-APS）和三晶体管有源像素传感器（3T-APS）设计的 64 × 120 有效分辨率像素阵列组成，可同时容纳可见光和紫外光的光路。即使在与 UV-OPD 集成后，底层的硅光电二极管（Si-PDs）仍能检测可见光，这得益于紫外光电二极管层的高透光性。图 8d 所示的 EQE 光谱证实了这一点：其中，UV-OPD 在 380 nm 处表现出峰值灵敏度，而 Si-PD 则在 580 nm 处表现出峰值灵敏度。该方案把重点转向分子设计获得的紫外选择性和对可见光背景的抑制，但阵列规模仍较小。



a. 紫外光电二极管 (UV-OPD) 的测得透射率光谱以及人眼归一化明视响应曲线



b. 单片集成CIS



c. 包含硅 (Si) 读出电路的集成CIS架构示意图　　d. UV-OPD及其底层Si-PD的归一化电光转换效率 (EQE) 光谱

图 8　有机图像传感器应用于 UV 成像

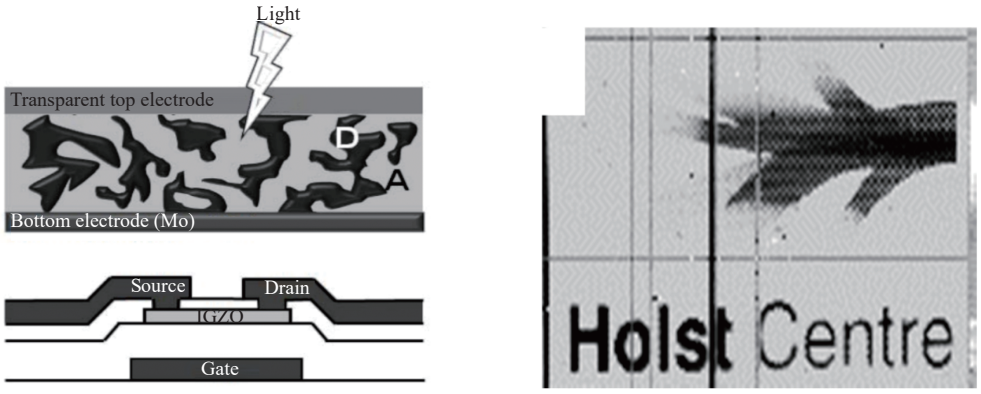
有机图像传感器紫外成像需要解决的问题是光谱纯度与系统稳定性：外置滤光会引入透过损失，本征 UV 选择有机层则仍需验证强紫外照射、偏压和环境应力下的响应漂移。下一步应关注可见背景抑制比、UV 信噪比、像素均一性。

3.4　X 射线间接成像

当前有机 X 射线图像传感器主要采用间接转换：X 射线先被闪烁体吸收并转换为可见光，再由 OPD 阵列完成光电转换，TFT 背板负责逐行寻址。因此，有机材料在该系统中并不直接探测 X 射线，其光谱响应必须与闪烁体发射匹配。系统分辨率和灵敏度同时受 X 射线剂量、闪烁体厚度及横向光扩散、OPD 暗电流、像素填充率、TFT 噪声和面内校正影响，不能用可见光条件下的 OPD 响应度直接代表 X 射线成像性能。

文献 [43] 在 PEN 基底的柔性 IGZO TFT 背板上沉积聚合物:PC61BM 感光层（图 9a），并与约 550 nm 发光的闪烁体耦合，形成 120×160、126 μm 像素和约 50% 填充率的间接 X 射线阵列。图 9b 中的图像是在阵列上方放置一个物体后获得的。该系统以大面积低温制程和机械柔性取代小像素优势，研究重点落在闪烁体转换、OPD 暗电流、TFT 寻址及剂量响应的共同匹配；其图像分辨率还受闪烁体光扩散和像素开口率限制。

该波段的关键瓶颈不在单一 OPD 响应度，而在闪烁体转换效率与横向光扩散，以及大面积阵列暗噪声与 TFT 均匀性之间的系统耦合。



a. 探测器的横截面　　b. 使用光电探测器拍摄的光学图像

图 9　有机图像传感器应用于 X 射线间接成像

4　结束语

综合现有研究，有机感光层已经在 3 类集成架构中获得不同尺度的成像验证：无背板/外接读出路线便于验证透明、颜色选择性、印刷和偏压调控等新机制；TFT 有源矩阵适合大面积、柔性、贴合及低温制造；CMOS/ROIC 异质集成则在小像素、高速、低噪声、宽动态和片上功能方面更具优势。3 类路线并非相互替代，而是在像素密度、面积、

功耗、光谱和制造成本之间作出不同权衡。

与单器件性能不断提高相比，现阶段更突出的矛盾是材料性能尚未稳定传递到像素、阵列和系统。未来突破主要受到 3 类约束：1）像素缩小后，入射光子数和节点容量降低，横向扩散、边缘泄漏、寄生电容及层间串扰同时增强，器件响应必须进一步转化为调制传递函数、PRNU、DSNU 和坏点统计；2）面积扩大和低温集成会放大膜厚、界面势垒、TFT 阈值、互连电阻及封装应力的空间差异，代表器件的峰值性能不能替代批次良率和寿命分布；3）不同研究采用的面积、偏压、光强、积分时间、噪声带宽和校正方法尚不统一，导致 D^*、动态范围和图像质量难以直接比较[24, 40]。针对上述限制，材料端需要在目标波段吸收、低暗电流、快速响应和工艺稳定性之间取得平衡，并提供偏压、频率、温度和稳定性数据；工艺与背板端需要围绕热预算、溶剂兼容、平坦化、图案化、像素互连和薄膜封装开展工作；电路与算法端则应公开节点电容、输入范围、噪声预算、校正流程和任务基线，把材料性能转化为可验证的系统收益[18, 53, 65]。

首要问题是要解决阵列均匀性与制造良率，因为膜厚、界面、TFT 阈值和互连的空间离散会直接转化为 PRNU、DSNU 与坏点，无法由少量高性能器件补偿；突破路径应是面板或晶圆级在线膜厚与缺陷监测、工艺窗口设计，以及大样本像素分布和批次良率报告。其次需解决长期可靠性的问题，其难点在于光照、偏压、温湿度和弯折共同作用，需要界面与封装协同设计，并以暗电流、响应、校正参数和任务图像漂移建立寿命模型。最后，测试标准化是支撑前两项的基础，应形成按器件、像素、阵列和系统的分层报告，统一有效面积、光谱与照度、偏压、积分时间、噪声带宽、校正状态和样本规模；只有这些条件可比，材料、背板和算法的改进才能转化为可信的决策。

总体而言，有机图像传感器在均匀性、长期可靠性、标准化测试和制造生态方面仍与成熟硅图像传感器存在差距，其近期价值更可能体现为对硅技术的功能补充。柔性贴合、大面积低温制造、透明显示前置、可调光谱以及感存协同等场景，为有机感光层提供了明确的差异化空间。随着进一步探索材料陷阱与暗电流机制，低温集成和封装窗口逐步稳定，并建立可复现的像素统计及端到端任务评价，有机图像传感器有望由功能原型走向面向特定应用的可制造系统。

参 考 文 献

[1] Bi Cheng, Liu Yanfei. CMOS-compatible optoelectronic imagers[J]. Coatings, 2022, 12(11): 1609.

[2] Lee S H, Yusoff A R B M, Lee C, et al. Toward color-selective printed organic photodetectors for high-resolution image sensors: From fundamentals to potential commercialization[J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2022, 147: 100660.

[3] Jansen-Van Vuuren R D, Armin A, Pandey A K, et al. Organic photodiodes: The future of full color detection and image sensing[J]. Advanced Materials, 2016, 28(24): 4766-4802.

[4] Shekhar H, Fenigstein A, Leitner T, et al. Hybrid image sensor of small molecule organic photodiode on CMOS – Integration and characterization[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 7594.

[5] Shan Tong, Hou Xiao, Yin Xiaokuan, et al. Organic photodiodes: Device engineering and applications[J]. Frontiers of Optoelectronics, 2022, 15(1): 49.

[6] Ren Hao, Chen Jingde, Li Yanqing, et al. Recent progress in organic photodetectors and their applications[J]. Advanced Science, 2021, 8(1): 2002418.

[7] Ajayan J, Sreejith S, Ravindran A, et al. Recent developments in organic photodetectors for future industrial applications: A review[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2025, 387: 116459.

[8] Liu Junshi, Wang Yaxi, Wen Han, et al. Organic photodetectors: Materials, structures, and challenges[J]. Solar RRL, 2020, 4(7): 2000139.

[9] Guo Fawen, Yang Bin, Yuan Yongbo, et al. A nanocomposite ultraviolet photodetector based on interfacial trap-controlled charge injection[J]. Nature Nanotechnology, 2012, 7(12): 798-802.

[10] 袁柳, 张玮奇, 王家棋, 等. 短波红外有机光探测材料的发展[J]. 电子科技大学学报, 2024, 53(5): 655-671.
Yuan Liu, Zhang Weiqi, Wang Jiaqi, et al. Development of short-wave infrared organic photodetection materials[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2024, 53(5): 655-671. (in Chinese)

[11] Du Lili, Luo Xiao, Zhao Feiyu, et al. Toward facile broadband high photoresponse of fullerene based phototransistor from the ultraviolet to the near-infrared region[J]. Carbon, 2016, 96: 685-694.

[12] Li Zijian, Yang Yanfei, Wu Yun, et al. Recent progress on photomultiplication type organic photodetectors[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2025, 58(7): 073004.

[13] Wu Yilin, Fukuda K, Yokota T, et al. A highly responsive organic image sensor based on a two-terminal organic photodetector with photomultiplication[J]. Advanced Materials, 2019, 31(43): 1903687.

[14] Wu Yilin, Matsuhisa N, Zalar P, et al. Low-power monolithically stacked organic photodiode-blocking diode imager by turn-on voltage engineering[J]. Advanced Electronic Materials, 2018, 4(11): 1800311.

[15] Ma Z, Renshaw C K. Organic photodetectors with frustrated charge transport for small-pitch image sensors[J]. Journal of Applied Physics, 2019, 126(4): 045501.

[16] Lee J, Georgitzikis E, Hermans Y, et al. Thin-film image

sensors with a pinned photodiode structure[J]. Nature Electronics, 2023, 6(8): 590-598.
[17] Xu Yangang, Ruan Chongpeng, Zhou Lei, et al. A 256 × 256, 50-μm pixel pitch OPD image sensor based on an IZO TFT backplane[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(18): 20824-20832.
[18] Malinowski P E, Pejović V, Lieberman I, et al. Image sensors using thin-film absorbers[J]. Applied Optics, 2023, 62(17): F21-F30.
[19] Simone G, Dyson M J, Meskers S C J, et al. Organic photodetectors and their application in large area and flexible image sensors: The role of dark current[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(20): 1904205.
[20] Nishimura K, Shishido S, Miyake Y, et al. An 8K4K-resolution 60fps 450ke$^-$-saturation-signal organic-photoconductive-film global-shutter CMOS image sensor with in-pixel noise canceller[C]//2018 IEEE International Solid-State Circuits Conference - (ISSCC). San Francisco: IEEE, 2018: 82-84.
[21] Nishimura K, Shishido S, Miyake Y, et al. Advanced features of layered-structure organic-photoconductive-film CMOS image sensor: Over 120 dB wide dynamic range function and photoelectric-conversion-controlled global shutter function[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57(10): 1002B4.
[22] Liu Taoming, Shan Tong, Guo Xiaojun. Organic photodetectors and system integration: Enabling next-generation human-machine interfaces for immersive display[J]. IEEE Open Journal on Immersive Displays, 2026, 3: 8-28.
[23] Park S, Lim Y, Heo C J, et al. Transparent organic photodiodes for high-detectivity CMOS image sensors[J]. Optica, 2022, 9(9): 992-999.
[24] Nakayama H, Nakabayashi K, Hata R, et al. Solution-processable organic photodiodes with high detectivity and thermal stability designed for visible or near-infrared CMOS image sensors[C]//Proceedings of SPIE 11809, Organic, Hybrid, and Perovskite Photovoltaics XXII. San Diego: SPIE, 2021.
[25] Nishimura K, Sato Y, Hirase J, et al. 6.1 An over 120dB simultaneous-capture wide-dynamic-range 1.6e$^-$ ultra-low-reset-noise organic-photoconductive-film CMOS image sensor[C]//2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). San Francisco: IEEE, 2016: 110-111.
[26] Hou Xiao, Tang Wei, Chen Sujie, et al. Large area and flexible organic active matrix image sensor array fabricated by solution coating processes at low temperature[C]//2021 5th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference (EDTM). Chengdu: IEEE, 2021: 1-3.
[27] Sakai T, Takagi T, Imamura K, et al. Color-filter-free three-layer-stacked image sensor using blue/green-selective organic photoconductive films with thin-film transistor circuits on CMOS image sensors[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2021, 3(7): 3085-3095.
[28] Machida S, Shishido S, Tokuhara T, et al. A 2.1-mpixel organic film-stacked RGB-IR image sensor with electrically controllable IR sensitivity[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2018, 53(1): 229-235.
[29] Li Yi, Chen Hu, Zhang Jianhua. Carrier blocking layer materials and application in organic photodetectors[J]. Nanomaterials, 2021, 11(6): 1404.
[30] Yang Weitao, Qiu Weiming, Georgitzikis E, et al. Mitigating dark current for high-performance near-infrared organic photodiodes via charge blocking and defect passivation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(14): 16766-16774.
[31] Lim Y, Yun S, Minami D, et al. Green-light-selective organic photodiodes with high detectivity for CMOS color image sensors[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(46): 51688-51698.
[32] Siddik A B, Georgitzikis E, Hermans Y, et al. Interface-engineered organic near-infrared photodetector for imaging applications[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(25): 30534-30542.
[33] Song Yu, Zhong Zhiming, He Penghui, et al. Doping compensation enables high-detectivity infrared organic photodiodes for image sensing[J]. Advanced Materials, 2022, 34(29): 2201827.
[34] Eckstein R, Strobel N, Rödlmeier T, et al. Fully digitally printed image sensor based on organic photodiodes[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(5): 1701108.
[35] Yoon S, Sim K M, Chung D S. Bifunctional etalon-electrode to realize high-performance color filter free image sensor[J]. ACS Nano, 2019, 13(2): 2127-2135.
[36] Kang Mingyun, Hassan S Z, Ko S M, et al. A molecular-switch-embedded organic photodiode for capturing images against strong backlight[J]. Advanced Materials, 2022, 34(17): 2200526.
[37] Kamijo T, Van Breemen A J J M, Ma Xiao, et al. A touchless user interface based on a near-infrared-sensitive transparent optical imager[J]. Nature Electronics, 2023, 6(6): 451-461.
[38] Ng T N, Wong W S, Chabinyc M L, et al. Flexible image sensor array with bulk heterojunction organic photodiode[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(21): 213303.
[39] Ng T N, Wong W S, Lujan R A, et al. Characterization of flexible image sensor arrays with bulk heterojunction organic photodiodes[C]//Proceedings of SPIE 7054, Organic Field-Effect Transistors VII and Organic Semiconductors in Sensors and Bioelectronics. San Diego: SPIE, 2008.
[40] Biele M, Benavides C M, Hürdler J, et al. Spray-coated organic photodetectors and image sensors with silicon-like performance[J]. Advanced Materials Technologies, 2019, 4(1): 1800158.
[41] Li Yi, Luo Hongde, Mao Longmei, et al. A solution-processed hole-transporting layer based on p-type $CuCrO_2$ for organic photodetector and image sensor[J]. Advanced Materials Interfaces, 2021, 8(20): 2100801.
[42] Shan Tong, Li Jun, Bai Qing, et al. Self-assembled monolayer assisted biphasic heterojunction organic photodiode for panel-level manufacturing of active-matrix optical imager[J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(19): 2419941.
[43] Gelinck G H, Kumar A, Moet D, et al. X-ray detector-on-plastic with high sensitivity using low cost, solution-processed organic photodiodes[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2016, 63(1): 197-204.
[44] Akkerman H, Peeters B, Van Breemen A, et al. 39-3:

Printed organic photodetector arrays and their use in palmprint scanners[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2018, 49(1): 494-497.
[45] Tordera D, Peeters B, Akkerman H B, et al. A high-resolution thin-film fingerprint sensor using a printed organic photodetector[J]. Advanced Materials Technologies, 2019, 4(11): 1900651.
[46] Imamura K, Miyakawa K, Imura S, et al. TFT active pixel sensors with organic photoconductive films for flexible sensor applications[C]//2024 IEEE SENSORS. Kobe: IEEE, 2024: 1-4.
[47] Aihara S, Seo H, Namba M, et al. Stacked image sensor with green- and red-sensitive organic photoconductive films applying zinc oxide thin-film transistors to a signal readout circuit[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2009, 56(11): 2570-2576.
[48] Kwang-Hee L, Dong-Seok L, Dong-Seok L, et al. Green-Sensitive organic photodetectors with high sensitivity and spectral selectivity using subphthalocyanine derivatives [EB/OL]. [2026-07-05]. https://doi.org/10.1021/am404122v.
[49] Yokota T, Nakamura T, Kato H, et al. A conformable imager for biometric authentication and vital sign measurement[J]. Nature Electronics, 2020, 3(2): 113-121.
[50] Yao Qi, Li Shipei, Qin Yunke, et al. Fingerprint recognition matrix based on photomultiplication-type organic photodetectors with a signal-to-noise ratio of 51, 400[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2025, 17(10): 15709-15717.
[51] Someya T, Kato Y, Iba S, et al. Integration of organic FETs with organic photodiodes for a large area, flexible, and lightweight sheet image scanners[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005, 52(11): 2502-2511.
[52] Malinowski P E, Vicca P, Willegems M, et al. Organic imager on readout backplane based on TFTs with cross-linkable dielectrics[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(21): 2197-2200.
[53] Hou Xiao, Chen Sujie, Tang Wei, et al. Low-temperature solution-processed all organic integration for large-area and flexible high-resolution imaging[J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2022, 10: 821-826.
[54] Park J, Kim M I, Lee E D, et al. Development of conjugated polymers from pharmaceutical intermediates for high-performance panchromatic organic photodetectors and fingerprint image sensors[J]. Small, 2025, 21(21): 2410797.
[55] Shin C, Jeong W, Darici Lee E, et al. Molecular engineering of benzobisoxazole-based conjugated polymers for high-performance organic photodetectors and fingerprint image sensors[J]. Energy & Environmental Materials, 2025, 8(1): e12806.
[56] Watabe T, Aihara S, Kubota N, et al. CMOS image sensor overlaid with an organic photoconductive film[EB/OL]. [2026-07-10]. https://www.imagesensors.org/Past%20Workshops/2005%20Workshop/2005%20Papers/13%20Watabe%20et%20al.pdf.
[57] Baierl D, Pancheri L, Schmidt M, et al. A hybrid CMOS-imager with a solution-processable polymer as photoactive layer[J]. Nature Communications, 2012, 3(1): 1175.
[58] Shishido S, Miyake Y, Sato Y, et al. 6.2 210ke− Saturation signal 3μm-pixel variable-sensitivity global-shutter organic photoconductive image sensor for motion capture[C]//2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). San Francisco: IEEE, 2016: 112-113.
[59] Okino T, Yamahira S, Yamada S, et al. A real-time ultraviolet radiation imaging system using an organic photoconductive image sensor[J]. Sensors, 2018, 18(1): 314.
[60] Takada S, Ihama M, Inuiya M. CMOS image sensor with organic photoconductive layer having narrow absorption band and proposal of stack type solid-state image sensors[C]//Proceedings of SPIE 6068, Sensors, Cameras, and Systems for Scientific/Industrial Applications VII. San Jose: SPIE, 2006.
[61] Ihama M, Hayashi M, Maehara Y, et al. CMOS color image sensor with overlaid organic photoelectric conversion layers having narrow absorption band : Depression of dark current[C]//Proceedings of SPIE 6656, Organic Photovoltaics VIII. San Diego: SPIE, 2007: 66560A.
[62] Lim S J, Leem D S, Park K B, et al. Organic-on-silicon complementary metal–oxide–semiconductor colour image sensors[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 7708.
[63] Han M G, Park K B, Bulliard X, et al. Narrow-band organic photodiodes for high-resolution imaging[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(39): 26143-26151.
[64] Park J, Pyo W J, Kang J, et al. Rational molecular design of π-extended thiazolothiazole for high-performance UV-OPDs seamlessly integrated with CMOS[J]. Advanced Materials, 2025, 37(38): 2506449.
[65] Talanti S, Fu Kerui, Zheng Xiaolong, et al. CMOS-integrated organic neuromorphic imagers for high-resolution dual-modal imaging[J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 4311.
[66] Isono S, Satake T, Hyakushima T, et al. A 0.9 μm pixel size image sensor realized by introducing organic photoconductive film into the BEOL process[C]//2013 IEEE International Interconnect Technology Conference - IITC. Kyoto: IEEE, 2013: 1-3.
[67] Togashi H, Watanabe T, Joei M, et al. Three-layer stacked color image sensor with 2.0-μm pixel size using organic photoconductive film[C]//2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). San Francisco: IEEE, 2019: 16.6. 1-16.6. 4.
[68] Kim J, Kweon H, Lee M, et al. Exciton-scissoring perfluoroarenes trigger photomultiplication in full color organic image sensors[J]. Advanced Materials, 2023, 35(45): 2302786.
[69] Hahn S, Park S, Yoo S. Bias-tunable two-terminal organic photodetector for intelligent imaging[J]. Advanced Science, 2026, 13(48): e75894.
[70] Yang Yimin, Zhang Kai, Kuvondikov V, et al. Flexible and stretchy organic photodetectors for wearable sensing[J]. Chinese Journal of Chemistry, 2026, 44(6): 869-880.

责任编辑 叶 芳