光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20260119001

低功耗EVS像素电路设计

江　琦，孙宇轩，尹尧轩，李春燕，常玉春*

（大连理工大学 集成电路学院，辽宁 大连 116024）

摘　要： 针对事件驱动的视觉传感器中存在的事件丢失与像素内比较器功耗较高的问题，文章基于180 nm CIS工艺，提出一种具备事件存储功能的低功耗像素电路。该电路在检测到事件后可储存事件信号并立即复位像素，以降低事件丢失率并减少像素内比较器功耗。传感器采用优先级保持型仲裁树进行事件读出，以降低事件处理延迟。所设计的像素电路由工作在光伏模式的光电二极管、开关电容放大器、共源级比较器及地址事件表示握手电路构成。对于64×64像素阵列，当事件率为50 MEPS时，系统在1.8 V供电电压下的整体功耗约为503.75 μW，其归一化动态功耗与静态功耗分别为5.14 pJ/event和60.18 nW/Pixel。结果表明，该设计通过事件锁存与即时复位架构，可有效降低动态功耗，因此适用于低功耗的视觉应用场景。

关键词： 基于事件的视觉传感器；低功耗设计；地址事件表示；光伏模式光电二极管

中图分类号： TP391.41　**文章编号：** 1001－5868(2026)03－0455－07

Low-Power Event-Based Vision Sensor Pixel Circuit Design

JIANG Qi, SUN Yuxuan, YIN Yaoxuan, LI Chunyan, CHANG Yuchun

(**School of Integrated Circuits, Dalian University of Technology, Dalian 116024, CHN**)

Abstract: To address the issues of event loss and high comparator power consumption within pixels in event-based vision sensors, we propose a low-power pixel circuit with event storage capability based on a 180 nm CIS process. Upon detecting an event, the circuit stores the event signal and immediately resets the pixel, thereby reducing the event loss rate and decreasing comparator power consumption. The sensor employs a priority-preserving arbitration tree for event readout, thereby reducing event processing latency. The pixel circuit consists of a photodiode operating in photovoltaic mode, a switched-capacitor amplifier, a common-source comparator, and an address-event representation handshake circuit. For a 64×64 pixel array operating at an event rate of 50 MEPS, the total power consumption of the system at a 1.8 V supply voltage is approximately 503.75 μW. Its normalized dynamic and static power consumption values are 5.14 pJ/event and 60.18 nW/pixel, respectively. These results demonstrate that the design effectively reduces dynamic power consumption through its event-latching and instantaneous-reset architecture, making it suitable for low-power vision applications.

Key words: event-based vision sensor; low-power circuit design; address-event representation; photovoltaic-mode photodiode

收稿日期：2026－01－19.

* **通信作者：**常玉春

0 引言

传统的基于帧的CMOS图像传感器(CIS)虽然在空间分辨率和帧率上持续提升,但在动态场景应用中仍存在明显局限性:固定帧率采样会产生大量静态冗余数据,尤其在自动驾驶、机器人视觉等场景中容易引发带宽拥堵;动态范围受限于满阱容量,在强光与弱光交替的复杂环境下易丢失图像细节,从而影响目标识别精度;无法获取曝光过程中的瞬时光照变化信息,因而难以捕捉高速运动目标的连续运动轨迹[1]。这些局限性在实时性要求严苛的新兴领域愈发突出。

为突破传统CIS的性能瓶颈,研究者们逐步开展生物视觉机制的借鉴与转化。生物学研究表明,人眼视网膜并非以固定的帧率采集完整图像,而是以事件驱动的方式,仅对光照的显著变化产生异步脉冲信号。该机制使得生物视觉具备微秒级的延迟、高于100 dB的动态范围和极低功耗的特性[2]。受此启发,基于事件的视觉传感器(EVS)应运而生。EVS的核心原理在于每个像素独立、异步地检测光照强度的对数域变化,当变化幅度超过预设阈值时,则产生一个编码有坐标(x,y)、极性(p)以及时间戳(t)的"事件",分别对应事件发生的位置、光照增强(ON事件)或减弱(OFF事件)以及触发的精确时刻[3-4]。这种以输出场景动态信息为核心的工作模式,从原理上规避了传统成像的数据冗余,并天然支持高速、低功耗的信息捕捉[5]。

事件视觉传感器的概念起源于20世纪80年代末Carver Mead提出的"神经形态工程"思想[6]。早期的硅视网膜虽然验证了事件驱动架构的可行性,但受限于响应均匀性差、动态范围有限等问题,难以投入实际应用[7]。2006年,苏黎世联邦理工学院的Lichtsteiner等推出首款具备使用价值的EVS,该传感器采用128×128像素阵列,可实现120 dB的动态范围、15 μs的事件延迟与23 mW的超低功耗,标志着EVS进入实际应用阶段[8]。为弥补EVS纯事件输出的不足,Posch等提出ATIS和DAVIS传感器,在EVS的基础上增加了曝光和灰度读出功能,拓展了传感器的场景适配性[9-10]。之后,索尼、三星、iniVation等公司不断创新,提出高分辨率高事件率的EVS产品。2023年,豪威公司发布15 MP CIS与1 MP EVS融合的三层堆叠混合型传感器,实现了4.6 GEPS的事件读出速率[11]。

针对传统EVS像素电路中事件易丢失及比较器功耗过高的问题,本文提出一种具备事件存储功能的低功耗像素电路。该电路在检测到光照变化超过阈值后,立即锁存事件信号并复位像素,从而降低事件丢失率与比较器动态功耗;同时采用优先级保持型仲裁树进行事件读出,减小处理延迟。文章首先介绍了像素阵列的系统架构,然后详细分析了像素电路的工作原理与低功耗机制,包括光伏模式光电二极管、开关电容放大器、共源级比较器及AER握手电路的设计。仿真结果表明,所提结构能够有效降低动态功耗,验证了其在低功耗视觉应用中的可行性。

1 传感器整体架构设计

EVS的整体架构如图1所示。该传感器由64×64的像素阵列、优先级保持型行列仲裁树、行列地址编码电路、数据处理电路、偏置产生电路和移位寄存器组成。

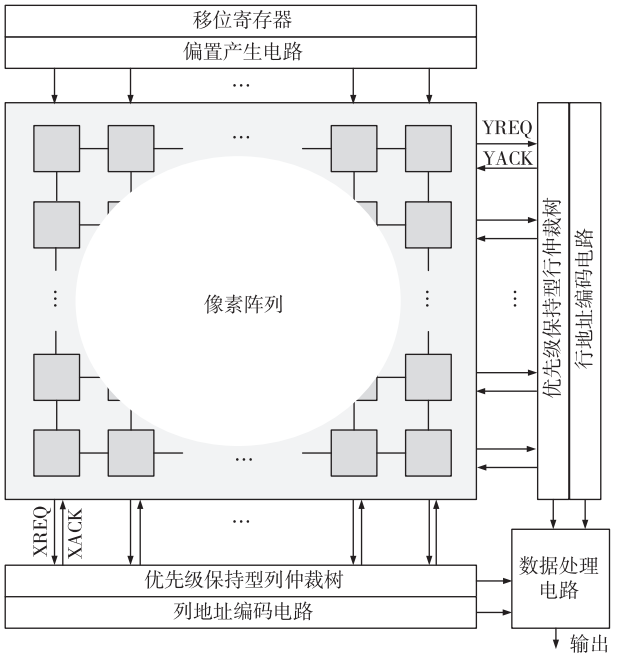


图1 传感器整体架构图

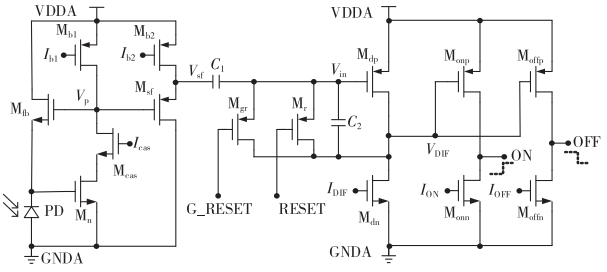
每个像素单元内置带有事件存储锁存功能的地址事件表示(AER)握手电路,并分别与行列仲裁器相连。该AER握手电路负责像素电路与外围电路之间的异步通信,同时协同完成事件锁存与像素快速复位,这是本文降低事件丢失率与比较器功耗的核心设计之一。在像素单元检测到光照变化超过阈值后,内置事件存储结构先锁存事件信号,同

时AER握手电路触发像素复位，使像素快速恢复至初始检测状态。随后，AER握手电路向对应行仲裁器发起行请求信号 $YREQ_i$。行仲裁器收到请求后进行判断，若仅存在单行有效请求，则直接对该行进行选通以完成行选择；若存在多行并发请求，则由仲裁电路确定获选行，并向获选行输出行应答信号 $YACK_i$。需要指出的是，$YACK_i$在物理上作用于整行像素，但实际仅对已产生事件的像素有效。这是因为在AER握手电路中，饥饿型与门的设计机制决定了仅输出ON或OFF信号的像素单元能够捕获 $YACK_i$，进而产生列请求。反之，未产生事件的像素单元则无法捕获该信号，从而保持静默。在收到行应答后，产生事件的像素(i,j)进一步向列仲裁器发送列请求信号 $XREQ_j$，列仲裁器向像素发送列应答信号 $XACK_j$。当 $YACK_i$与 $XACK_j$同时作用于像素内部AER握手电路时，锁存器的复位信号RST被触发，从而清除事件锁存，并使像素内AER握手电路恢复至初始状态，标志该事件读出完成并进入下一轮事件检测。同时，行列仲裁器产生的应答信号通过行列地址编码电路的接口被采样，用于指示并输出当前正在读出的像素的行列地址信息。

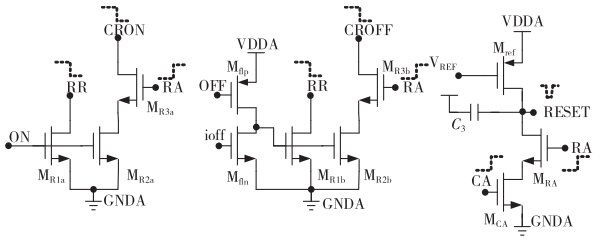
2　电路设计

2.1　像素结构和工作原理

传统EVS像素电路如图2，主要由光电转换、开关电容放大器、阈值比较器和AER握手电路组成。



（a）像素核心电路



（b）AER握手电路

图2　传统EVS像素电路

光电转换模块采用对数像素结构，利用MOSFET沟道漏电流与过驱动电压之间的关系，实现光电流向电压信号转换。负载管 M_{fb}工作在亚阈值区，当光电流流经时，其栅端电压与光电流呈对数关系，这种对数电压特性有助于扩展EVS像素的动态范围。开关电容放大器负责对光电转换输出的对数电压进行放大，而后级阈值比较器负责将放大后的信号与预设阈值进行对比。阈值比较器主要利用两组放大器不同的静态工作点实现对放大后电压 V_{DIF}的动态监测，其静态工作点可以通过设置偏置电流大小和调节放大管尺寸来进行设计。

EVS像素的工作原理如图3所示。光电转换模块将入射光强的变化转换为瞬态电压信号，该信号随后被开关电容放大器放大，得到输出电压 V_{DIF}。放大后的 V_{DIF}电压被送入两个电压比较器，分别与正、负两个预设阈值进行比较。当 V_{DIF}超过某个阈值（无论是正值还是负值）时，通过两个电压比较器触发事件，并通过共享通道利用AER通信协议传输。

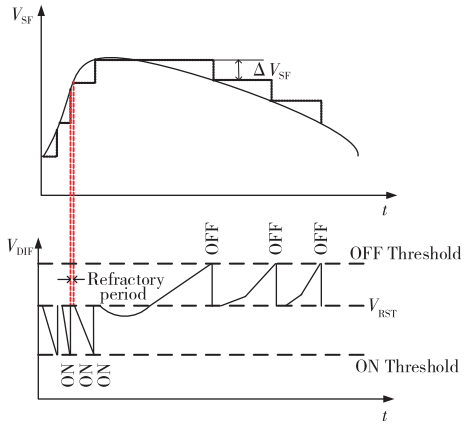


图3　EVS像素工作原理图

此外，工作在光伏区的光电二极管，其开路电压 V_{oc}与光电流 I_{ph}呈对数关系，具体表示为[12]：

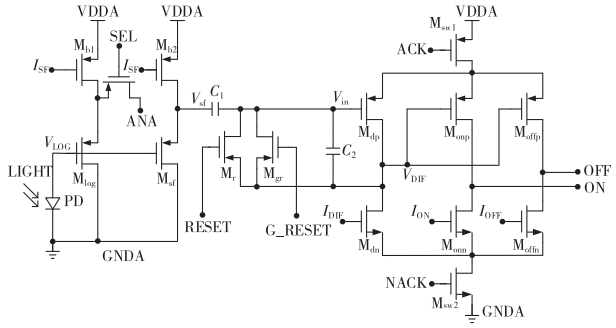
$$V_{oc}=\eta U_T \ln\left(1+\frac{I_{GR}}{I_S}\right)\approx \eta U_T \ln\left(1+\frac{I_{ph}}{I_S}\right) \quad (1)$$

式中，η是二极管的发射系数，I_S是二极管的反向饱和电流，U_T为热电压，I_{GR}是产生-复合电流。

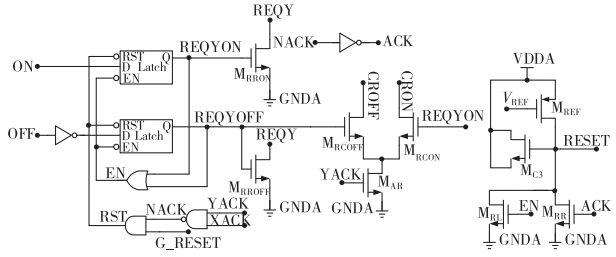
在传统EVS的像素前端中，需通过“反向偏置二极管＋独立对数光感受器＋共源级放大器”的组合电路，才能实现光照与电信号的对数映射，而这类有源模块会引入持续的静态功耗。本设计直接利用光伏区光电二极管的固有对数特性，替代传统前端中额外的对数转换与放大单元，可有效减少像

素电路的有源器件数量，并降低像素的功耗[12]。

图4为所提出的EVS像素电路结构。传统的EVS像素电路只能产生ON/OFF事件，无法生成灰度图像。而在本设计中，仅利用一个源极跟随器电路来获取绝对电流信息，以实现灰度成像功能，同时可以节省面积并提高功率效率，如图4(a)所示。因此，每个像素中共包含两个源极跟随器：一个用于产生输出电流，另一个用于ON/OFF事件的生成。ON和OFF事件通过像素内AER握手电路传送到外围，实现四相AER握手协议。行和列的ON/OFF请求信号彼此独立生成，并被储存在图4(b)所示的Latch中，而应答信号在行或列内共享[1]。



(a) 像素核心电路



(b) 锁存与即时复位AER握手电路

图4 低功耗EVS像素结构

行和列的ON/OFF请求信号各自独立生成，并连接到总线(REQY，CRON和CROFF)上。应答信号(YACK，XACK)则是共享的，这是因为像素只会产生ON或OFF事件中的一种，而不会同时发生。行信号REQY和YACK由行内像素共享，信号CRON，CROFF和XACK则由列共享。REQY，CRON和CROFF通过行和列静态偏置的PMOS上拉电阻拉至高电平。CRON和CROFF通过阵列外与非门生成高电平有效的列请求信号XREQ。当ON或OFF比较器由复位状态发生状态改变时，通信周期开始；当像素内锁存器复位信号触发时，通信周期结束。像素中的M_r复位晶体管通过平衡差分电路来复位像素电路。此外，M_r还具有启用可调不应期的功能(由饥饿型NOR门实现，该门由M_{REF}，M_{RL}和M_{RR}组成，如图4(b)所示)，在此期间像素无法产生另一个事件[1]。

M_{gr}作为可编程复位开关，由阵列外移位寄存器控制，从而实现对部分或者全部像素列进行独立的复位控制。该设计通过将被选中的像素保持在复位状态，使其与共享总线隔离，以降低总线负载以及后续处理电路的功耗与带宽需求。通过将复位区域动态配置在感兴趣区域，可以保证功能完整性的同时，优化系统的资源分配[8]。本文后续工作配置移位寄存器使所有像素保持正常工作状态。

如图5以ON事件为例，展示了像素电路的完整工作时序。

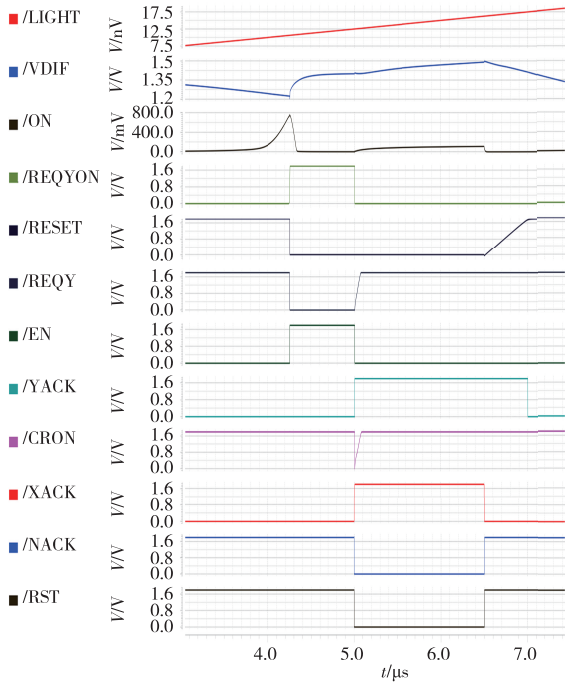


图5 ON事件的产生与处理

当像素入射光强LIGHT逐渐增强时，光电感应前端电路使开关电容放大器的输出电压V_{DIF}相应下降。当V_{DIF}达到ON事件触发阈值后，像素产生ON事件。随后，像素内AER握手电路将该事件锁存，使行请求指示信号REQYON置高。与此同时，电路立即产生RESET信号以复位像素，并关闭锁存器Latch的使能信号EN，以避免事件信息在传输过程中被覆盖；行请求总线REQY被拉低，表示该行有事件请求输出；像素进入等待状态以接收行仲裁树的调度。当行仲裁树选中该像素所在行后，

输出行应答信号 YACK。AER 握手电路接收到 YACK 后，进一步拉低列请求信号线 CRON 发起列请求；列仲裁树响应列请求并返回列应答信号 XACK。至此，该像素事件的行、列仲裁与握手传输过程完成，随后产生 RST 信号对像素内 Latch 进行复位，从而结束一次完整的通信周期。

2.2　低功耗设计

如第 2.1 节所述，所提出的像素结构通过事件锁存与即时复位机制实现低功耗。本节将首先分析传统 EVS 像素动态功耗的主要来源，进而详细阐述本设计是如何解决这些问题的。为保证光照增强或减弱超过阈值时，比较器输出 ON 或 OFF 事件，设置两个比较器的偏置电流 I_{ON} 较大而 I_{OFF} 较小。因此，当像素处于平衡（复位）状态时，V_{DIF} 等于复位电平，两个比较器的输出都处于初始状态，不会产生事件请求；且此时两个比较器支路的电流都比较小，功耗较低。当光照强度发生变化，比较器的输入信号 V_{DIF} 改变时，M_{onp} 和 M_{offp} 的工作状态也随之改变。当 V_{DIF} 下降到某一值使 M_{onp} 产生的上拉电流超过 I_{ON} 时，ON 信号变为高电平，该支路在像素被 AER 握手电路复位前会一直保持较高的导通电流。对于规模较大的像素阵列，其等待响应时间可能长达数微秒，导致比较器功耗显著增加，这是 EVS 像素动态功耗的主要来源之一。

所设计的低功耗通过两项核心机制实现。第一项为引入事件锁存与即时复位机制，即在 ON 或 OFF 事件产生后，通过 AER 握手电路将事件保存到 Latch 中，防止事件因未被及时处理而丢失；同时，该机制可以在锁存到事件之后立刻复位像素，从而避免阵列中同时出现多个像素的比较器输出长时间保持高电平，有效降低了由此引发的动态功耗。第二项为在像素核心的比较器部分集成了开关管 M_{sw1} 和 M_{sw2}，当事件被 AER 握手电路锁定且正在被应答时，可通过断开开关管来关闭比较器；此时行列仲裁器仅需处理已经锁定的 REQYON 或 REQYOFF 信号，进一步降低功耗。

对该设计降低动态功耗的原理进行分析：在本文提出的锁定事件后即刻复位像素是在像素内 AER 握手电路锁定事件后立刻将开关电容放大器复位，使其输出电压恢复到复位值 V_{RST}，从而使得阈值比较器导通时间大幅降低，进而降低功耗。阈值比较器两端的开关可以在此基础上进一步降低功耗，当像素正在被行列仲裁模块应答，即像素接收到应答信号 YACK 和 XACK 时，像素内 AER 握手电路会产生像素内应答信号 ACK，该信号通过切断阈值比较器的供电以使其在读出阶段停止工作，从而进一步降低功耗。

3　电路仿真结果

3.1　单颗像素仿真结果

采用 180 nm CMOS 工艺，基于 Cadence 软件平台对所设计 EVS 像素进行仿真验证。EVS 的动态范围（DR）定义为能够对“高对比度刺激”可靠产生事件的最大场景照度与最小场景照度之比[1]，计算公式为 $DR=20\lg(LI_{max}/LI_{min})$。对像素进行仿真，得到最大光强 $LI_{max}=218$ klux 和最小光强 $LI_{min}=5$ lux，计算得到动态范围约为 92.79 dB。

在该像素上施加逐步增强的光照激励，因仅单个像素触发事件，系统响应迅速，在 30 μs 内共产生 6 次 ON 事件，经计算得事件率约为 200 kEPS。仿真结果如图 6 所示，信号自上而下分别为 ON 事件、行请求、行应答、列请求、列应答及像素核心电路的电流。通过 Virtuoso Calculator 计算得到这段时间内核心电流的平均值约为 55.42 nA，即单颗像素在 200 kEPS 下的功耗约为 99.8 nW。在相同激励条件下仿真测试传统 EVS 像素，得到其在 200 kEPS 下功耗约为 136.1 nW。结果表明，通过像素内锁存器实现快速复位并结合比较器通路开关控制，本设计在事件响应期间的功耗降低了约 30%，这主要得益于事件锁存与即时复位机制显著缩短了比较器的高电流状态持续时间。

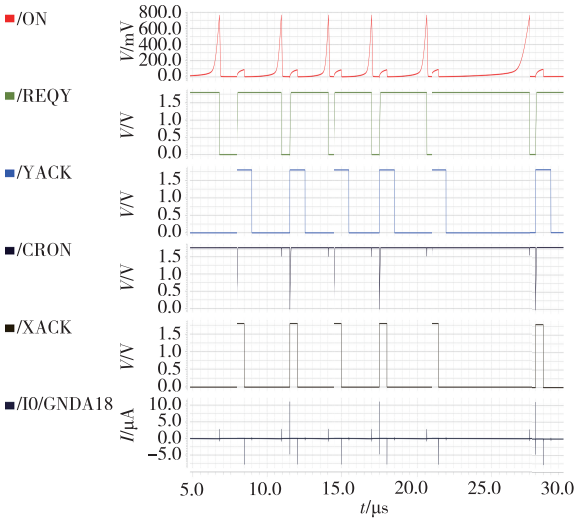


图 6　单个像素在增强光照下的时序与功耗

3.2 像素阵列仿真结果

采用64×64的像素阵列进行仿真与验证，并通过优先级保持型仲裁树进行事件的处理与读出。当该仲裁单元在双输入请求同时有效时，可以在处理完一个请求后，暂不释放访问许可，而是继续处理同一单元内的另一个请求，直至两个请求均完成后再向上级释放许可。在树状仲裁结构中，该机制可以形成访问许可的快速传递路径，无需逐级归还至顶层仲裁器即可定向下发至活跃像素，从而显著降低事件传输延迟；在请求稀疏时，该单元则退化为传统的公平仲裁模式，兼顾了处理效率与公平性[13]。

对整个阵列施加快速变化的均匀光照，以模拟高事件率场景，仿真结果如图7所示。在370.59～371.21 μs的时间窗口内，阵列累计完成31次事件响应，对应事件率为50 MEPS。在该时段内，像素阵列（含握手电路）与仲裁树模块的平均工作电流分别约为251.6 μA和28.26 μA；在1.8 V电源电压下，对应的总功耗约为503.75 μW。

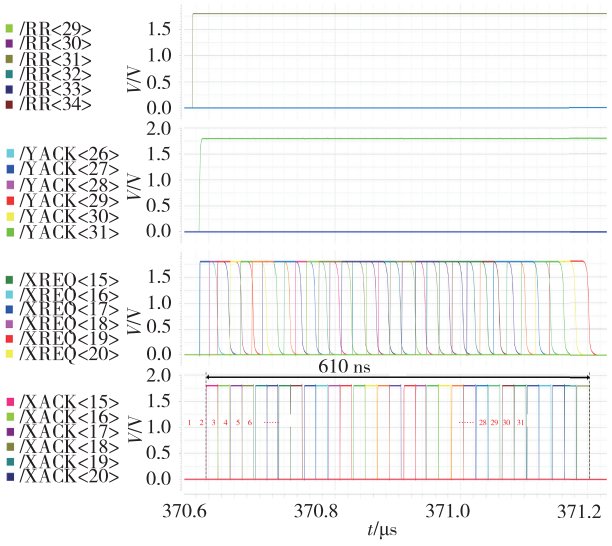


图7 像素阵列在增强光照下的时序

在低事件率条件下对电路进行仿真，模拟电路中少数像素经历缓慢光照变化的场景。测得在100 kEPS事件率下，像素阵列（含握手电路）与仲裁树模块的总功耗约为247.03 μW。为了便于对不同工作状态下的能耗进行比较，引入归一化功耗进行量化分析，计算方法如下[14]：

$$Dynamic\ Energy = \frac{P_H - P_L}{R_H - R_L} \quad (2)$$

$$Static\ Power = \frac{P_L - R_L \times Dynamic\ Energy}{N_P} \quad (3)$$

式中，P_H是系统在高活动性下的功耗，P_L是系统在低活动性下的功耗，R_H是系统在高活动性下的事件率，R_L是系统在低活动性下的事件率，N_P是像素的个数。基于公式(2)和(3)，可进一步计算得到像素的动态能量与静态功耗分别为5.14 pJ/event和60.18 nW/Pixel。

3.3 结果对比

与文献[11]和[15]的部分参数对比如表1所示，所提设计的归一化动态功耗分别降低为1/10.7与1/33.7。这一结果表明，本文所采用电路架构的低功耗特性并非依赖于特定工艺节点的优化，而是源于工作机制的改进。因此，在面向未来更高分辨率的视觉应用时，该架构在缓解系统级功耗方面将展现出更大的优势。

表1 结果对比

指标参数		文献[11]	文献[15]	本文
工艺		40 nm BSI+65 nm CMOS	90 nm BSI+40 nm CMOS	180 nm CMOS
分辨率		1 032×928	1 280×720	64×64
像素尺寸/μm²		8.8×8.8	4.86×4.86	20×20
供电电压/V			2.5,1.1	1.8
动态范围/dB			124	93
功耗	高活动率	46 mW@300 MEPS	84 mW@300 MEPS	503.75 μW@50 MEPS
	低活动率	30 mW@100 kEPS	32 mW@100 kEPS	247.03 μW@100 kEPS
归一化功耗	动态/(pJ/event)	55	173	5.14
	静态/(nW/Pixel)	31	35	60.18

4 总结

本文提出一种基于180 nm CIS工艺的低功耗EVS像素电路设计。该设计的核心在于像素内部的AER握手电路中集成了事件锁存与即时复位功能。该机制通过锁存事件并立即复位像素的方式，显著缩短了比较器在高电流状态下的工作时间，从而有效降低了像素的动态功耗。总体而言，所设计的像素电路通过事件锁存与即时复位逻辑，有效降低了像素的动态功耗。通过电路架构的创新，即便在180 nm这类成熟工艺节点上，也能实现低功耗特性，可适用于功耗和成本均较为敏感的可穿戴设备及工业监控等领域。

参考文献：

[1] Lichtsteiner P, Posch C, Delbruck T. A 128× 128 120 dB 15

μs latency asynchronous temporal contrast vision sensor[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2008, 43(2): 566-576.

[2] Posch C, Serrano-Gotarredona T, Linares-Barranco B, et al. Retinomorphic event-based vision sensors: bioinspired cameras with spiking output[J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(10): 1470-1484.

[3] 方应红, 徐　伟, 朴永杰, 等. 事件视觉传感器发展现状与趋势[J]. 液晶与显示, 2021, 36(12): 1664-1673.
Fang Yinghong, Xu Wei, Piao Yongjie, et al. Development status and trend of event-based vision sensor[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2021, 36(12): 1664-1673.

[4] 孔德磊, 方　正. 基于事件的视觉传感器及其应用综述[J]. 信息与控制, 2021, 50(1): 1-19.
Kong Delei, Fang Zheng. A review of event-based vision sensors and their applications[J]. Information and Control, 2021, 50(1): 1-19.

[5] 李家宁, 田永鸿. 神经形态视觉传感器的研究进展及应用综述[J]. 计算机学报, 2021, 44(6): 1258-1286.
Li Jianing, Tian Yonghong. Recent advances in neuromorphic vision sensors: a survey[J]. Chinese Journal of Computers, 2021, 44(6): 1258-1286.

[6] Mahowald M. An analog VLSI system for stereoscopic vision[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 1994.

[7] Herault J. Biologically inspired computer vision: fundamentals and applications[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.

[8] Lichtsteiner P, Posch C, Delbruck T. A 128 ×128 120 dB 30 mW asynchronous vision sensor that responds to relative intensity change[C]//2006 IEEE International Solid State Circuits Conference - Digest of Technical Papers, 2006: 2060-2069.

[9] Posch C, Matolin D, Wohlgenannt R. An asynchronous time-based image sensor[C]//2008 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2008: 2130-2133.

[10] Brandli C, Berner R, Yang M, et al. A 240 × 180 130 dB 3 μs latency global shutter spatiotemporal vision sensor[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2014, 49(10): 2333-2341.

[11] Guo M, Chen S, Gao Z, et al. A three-wafer-stacked hybrid 15-MPixel CIS 1-MPixel EVS with 4.6-GEvent/s readout, in-pixel TDC, and on-chip ISP and ESP function[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2023, 58(11): 2955-2964.

[12] Fernández-Peramo P, Leñero-Bardallo J A, Rodríguez-Vázquez Á. A photovoltaic dynamic vision sensor[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2025, 60(9): 3355-3365.

[13] Boahen K A. Point-to-point connectivity between neuromorphic chips using address events [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, 2000, 47(5): 416-434.

[14] Li C, Longinotti L, Corradi F, et al. A 132 by 104 10 μm-pixel 250 μW 1 kefps dynamic vision sensor with pixel-parallel noise and spatial redundancy suppression [C]//2019 Symposium on VLSI Circuits, 2019: C216-C217.

[15] Finateu T, Niwa A, Matolin D, et al. 5.10 a 1280 × 720 back-illuminated stacked temporal contrast event-based vision sensor with 4.86 μm pixels, readout1.066GEPS, programmable event-rate controller and compressive data-formatting pipeline[C]//2020 IEEE International Solid-State Circuits Conference, 2020: 112-114.

作者简介：

江　琦(2001—)，男，河北省石家庄市人，硕士研究生，主要研究方向为模拟集成电路设计；

常玉春(1973—)，男，教授，博士生导师，研究方向为CMOS图像传感器及图像信号处理电路等。