中国科学院半导体研究所
Institute of Semiconductors,Chinese Academy of Sciences

物院青年教师线上论坛（第15期）

人工智能视觉芯片

刘力源

中国科学院半导体研究所
半导体芯片物理与技术全国重点实验室
高速图像传感与信息处理课题组

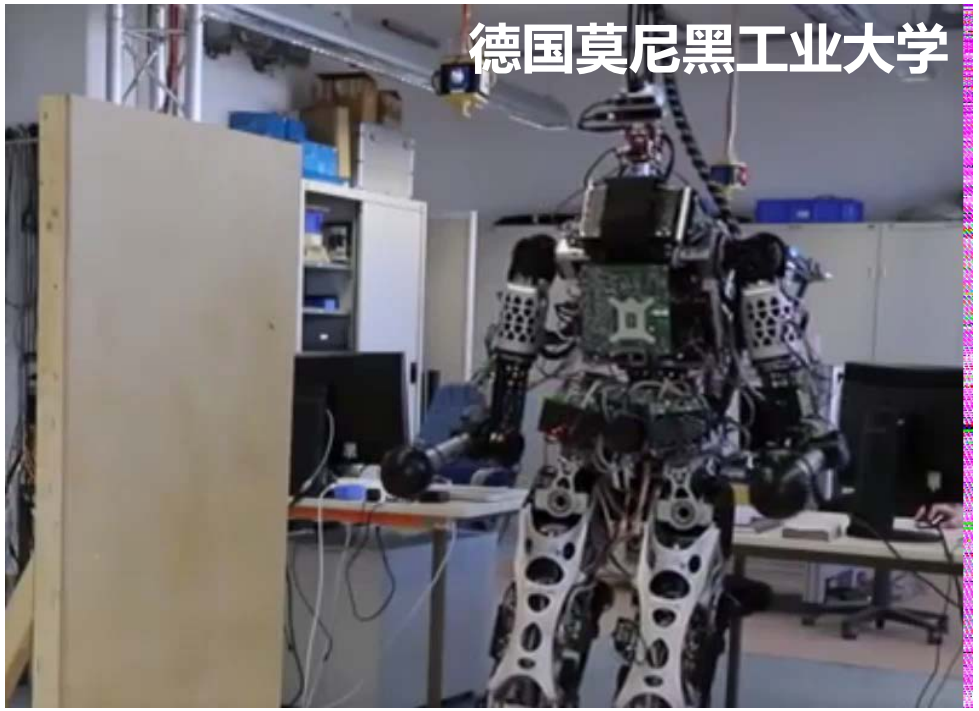
2025年6月

内容提纲

- 视觉芯片研究背景
- 视觉芯片研究成果
- 视觉芯片应用案例

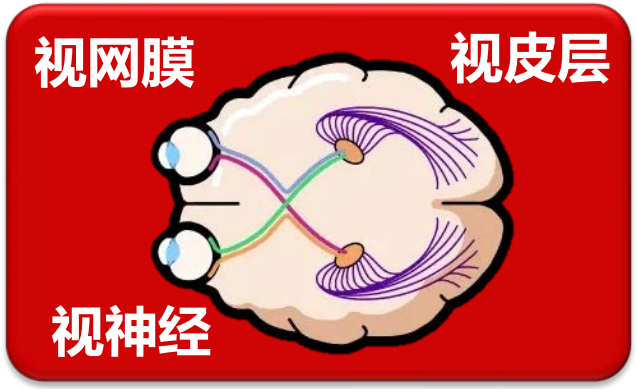
视觉芯片概念

人类信息的80%是视觉信息，视觉是观察和认知世界的重要手段。

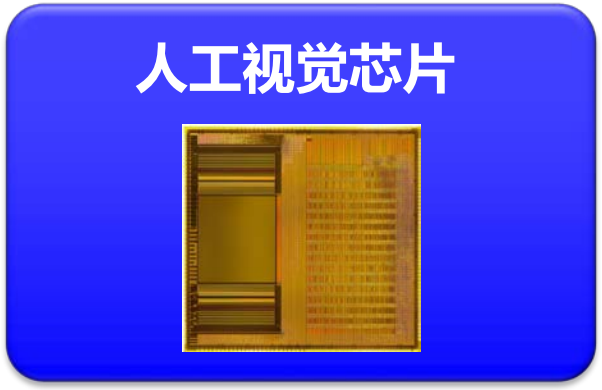


（图片来自互联网）

生物视觉系统



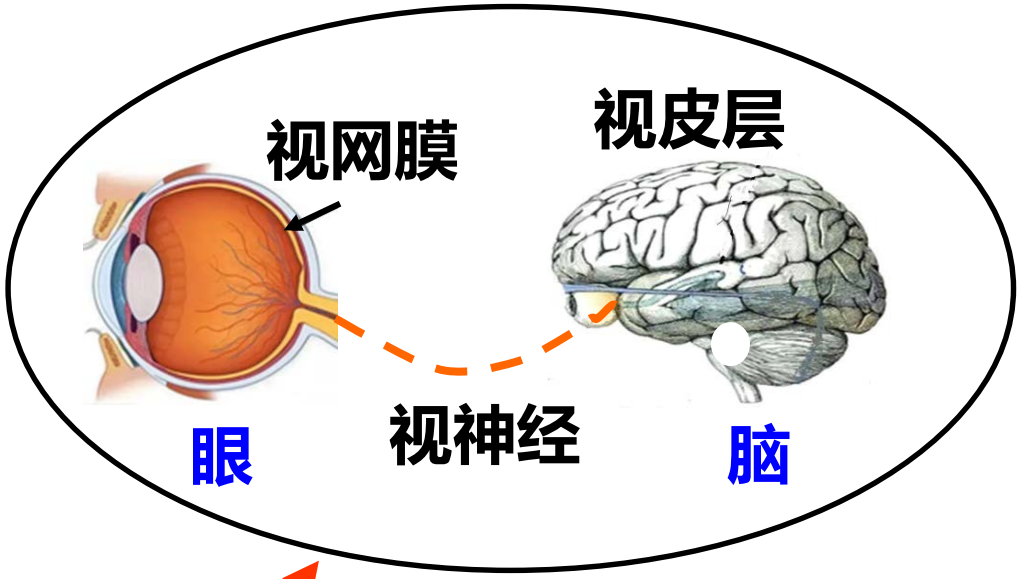
模仿、超越



人工视觉系统

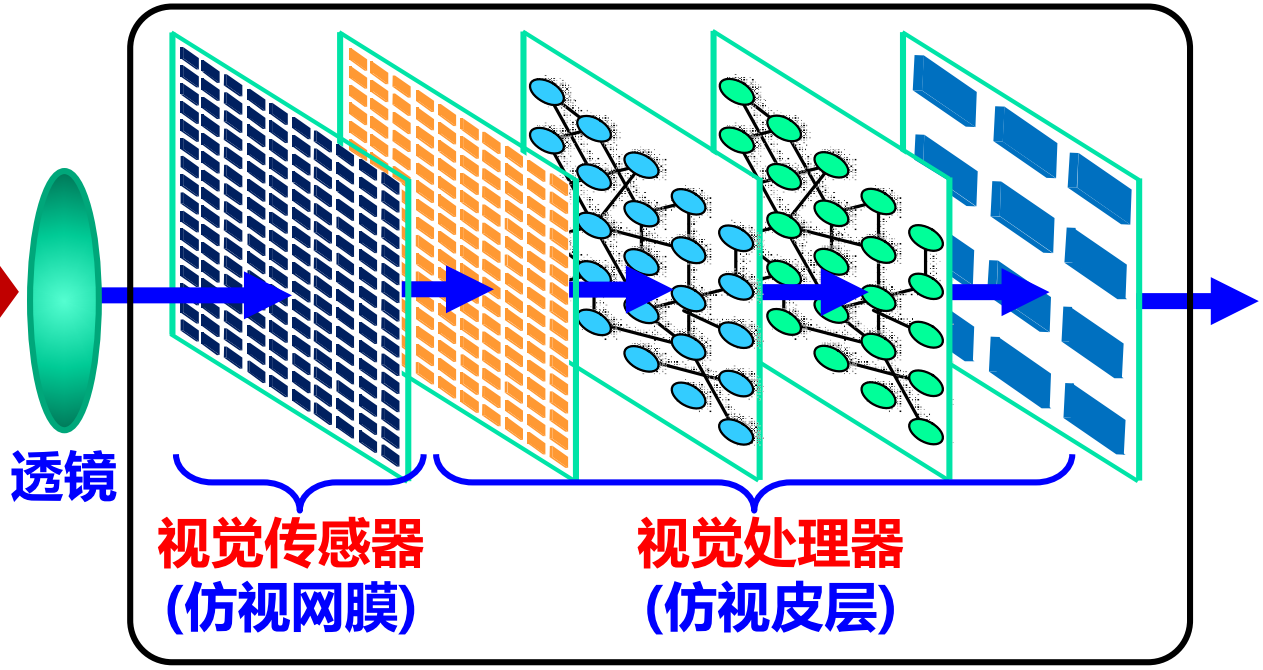
视觉芯片概念

生物视觉系统

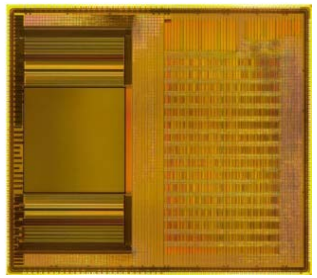


- 视网膜: 感知视觉信息
- 视神经: 传输视觉信息
- 视皮层: 处理视觉信息

人工视觉芯片



视觉芯片

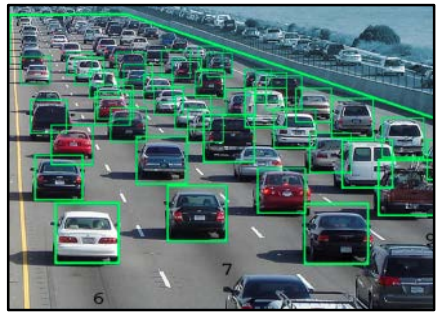


- 视觉感存算一体化集成
- 高速、低功耗、高集成
- 模仿并超越人视觉系统

视觉芯片应用领域

- 工业制造
- 智能监控
- 国防安全
- 科研观测
- 商业娱乐

无人机



智能交通

智能监控

体感游戏

自动辅助驾驶

AR/VR

工业自动化

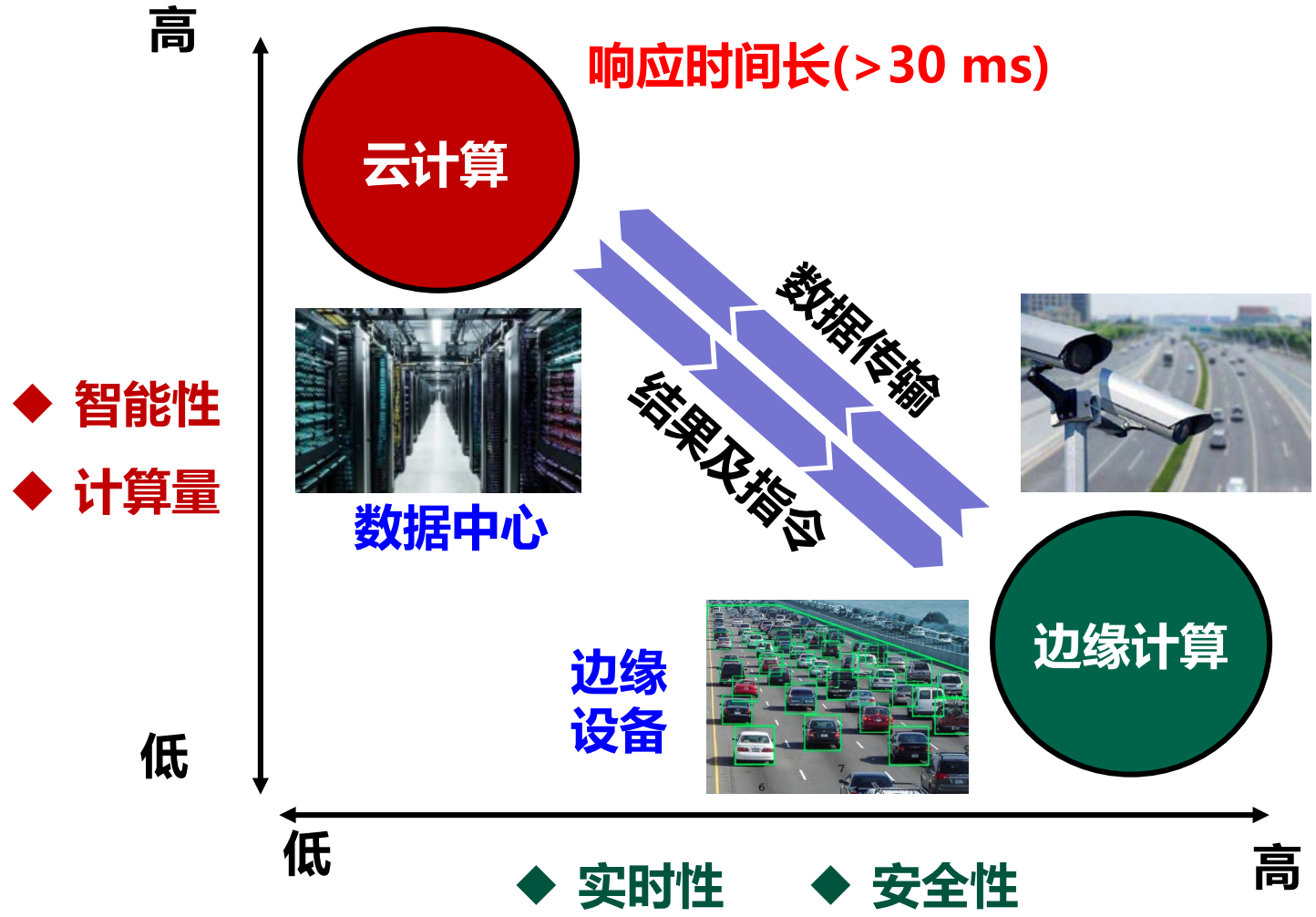
国防安全

目标追踪

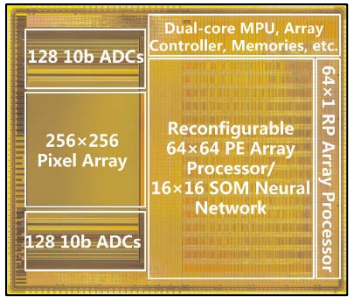
(图片来自互联网)

视觉芯片技术先进性

人工视觉片上系统芯片：边缘型计算芯片



视觉芯片



实时响应 (< 30 ms)

- 近传感器端的数据处理
- 消除数据传输速度瓶颈
- 提高数据处理决策速度

视觉芯片技术先进性

颠覆性技术

- 人工视觉传感和处理融合，打破“图像传感器”+“图像处理器”分离的模式
- 高集成、低功耗、小体积、处理能力强，可破解图像数据实时处理的难题

关键技术1“感”
视觉传感器

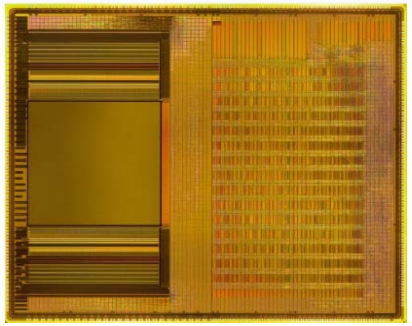
视觉传感芯片

关键技术2“算”
视觉处理器

视觉处理芯片

一体化集成

关键技术3“集成”
感存算集成



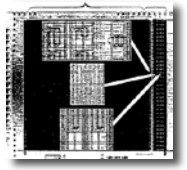
人工智能视觉芯片

视觉芯片技术发展历程

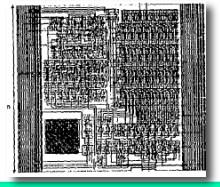
(ISCAS：中国科学院半导体研究所)

- Mead C. Neuromorphic electronic systems. Proceedings of the IEEE, 1990,78(10):1629.
- Wyatt J L, et,al: The MIT vision chip project: Analog VLSI systems for fast image acquisition and early vision processing. 1991

MIT W. (IEEE ICRA)

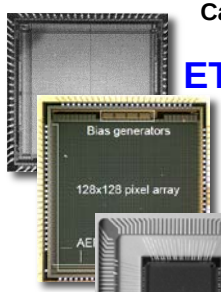


U.Tokyo I.Lshii (ISSCC)



Johns Hopkins U. Cai (JSSC)

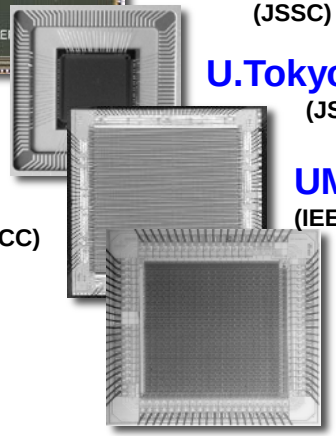
ETH



ITC-irstx M. (JSSC)

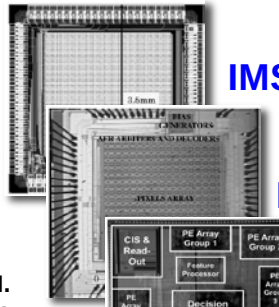
U.Tokyo M. (JSSC)

UMIST D. (IEEE TCAS)

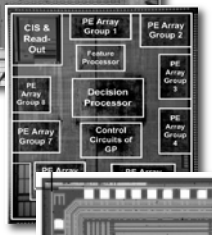


Burgundy U.

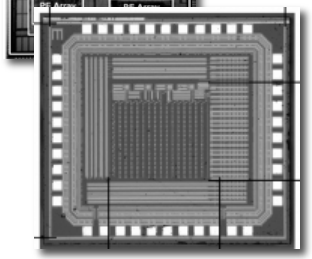
IMSE



NTU Chen (JSSC)

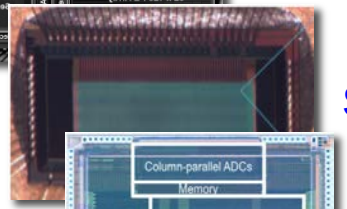


ISCAS Wu (JSSC)

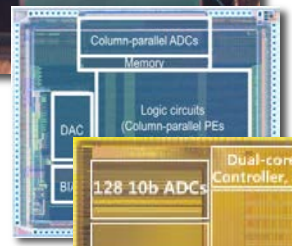


ISCAS Wu (JSSC)

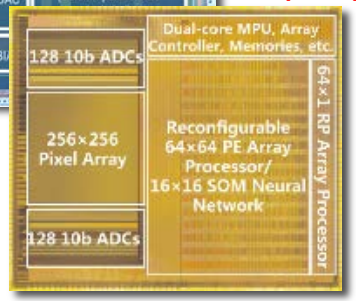
FBK J. (JSSC)



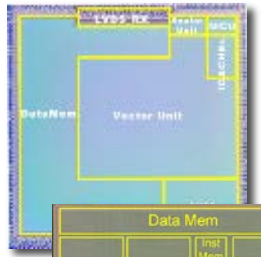
Sony (ISSCC)



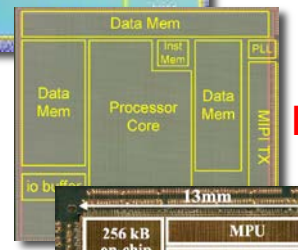
ISCAS Wu (JSSC)



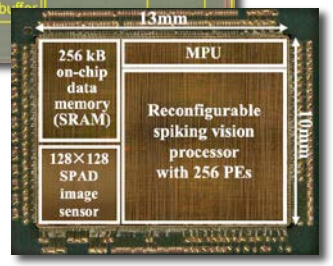
ISCAS Wu (TCAS-II)



ISCAS Wu (TCAS-I)



ISCAS Liu (JSSC, ISSCC)



1990 2000 2005 2010 2015 2024

视觉系统芯片概念

CMOS图像传感器芯片技术

智能图像处理芯片技术

CMOS集成封装技术

Mainly from IEEE Xplore Digital Library

内容提纲

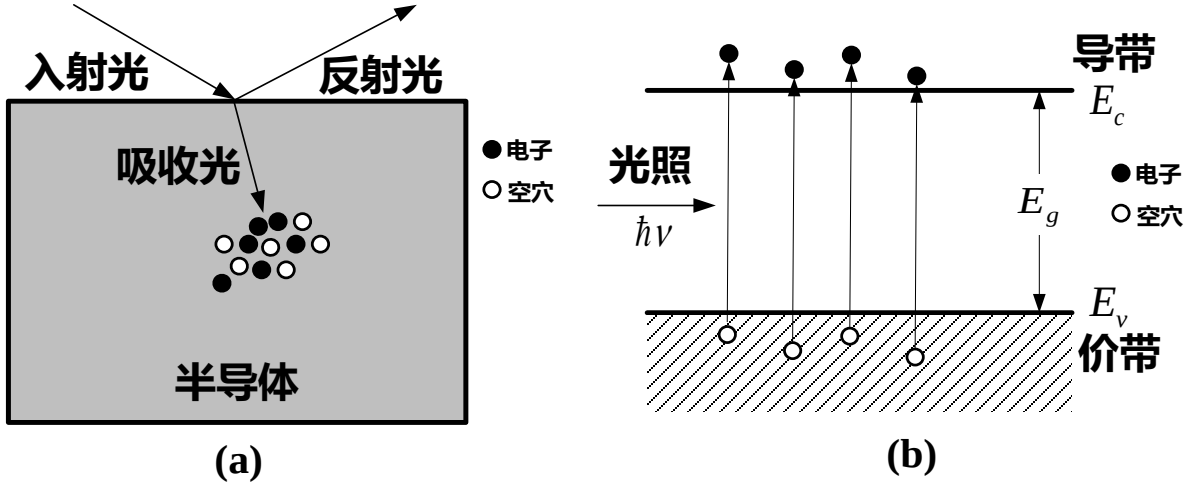
- 视觉芯片研究背景
- 视觉芯片研究成果
- 视觉芯片应用案例

内容提纲

- 视觉芯片研究背景
- 视觉芯片研究成果
  - 视觉图像传感器
  - 智能图像处理器
  - 感算一体视觉芯片
- 视觉芯片应用案例

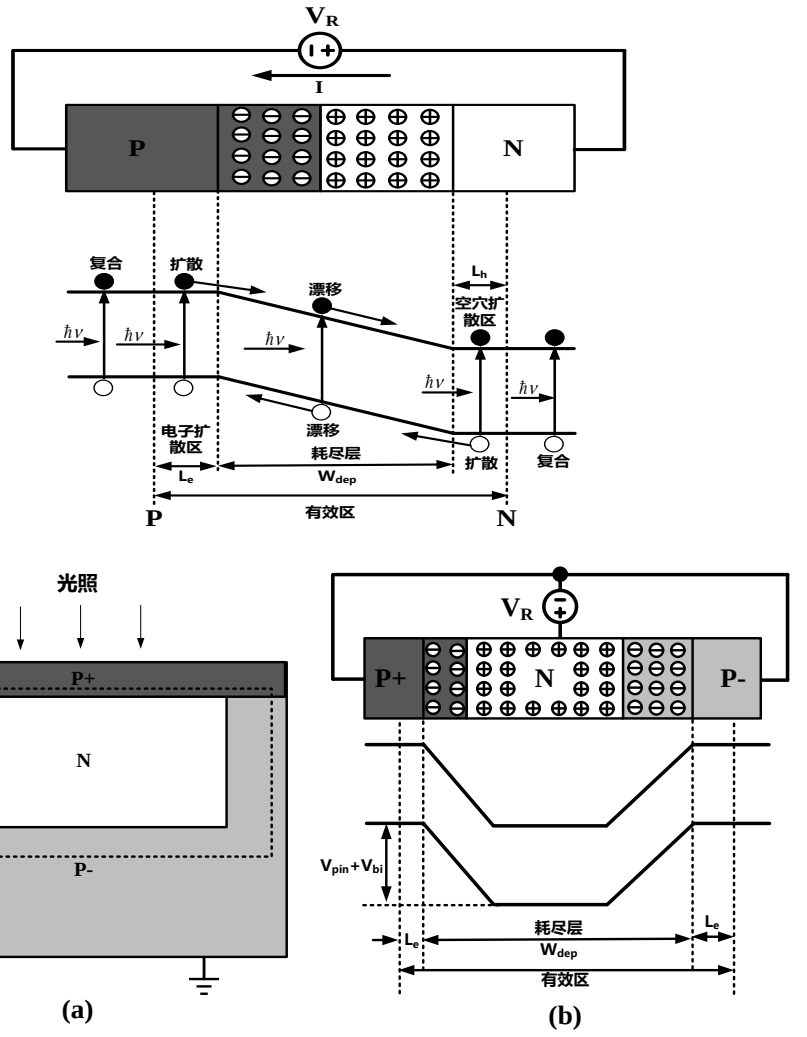
视觉图像传感器

半导体中的光电效应

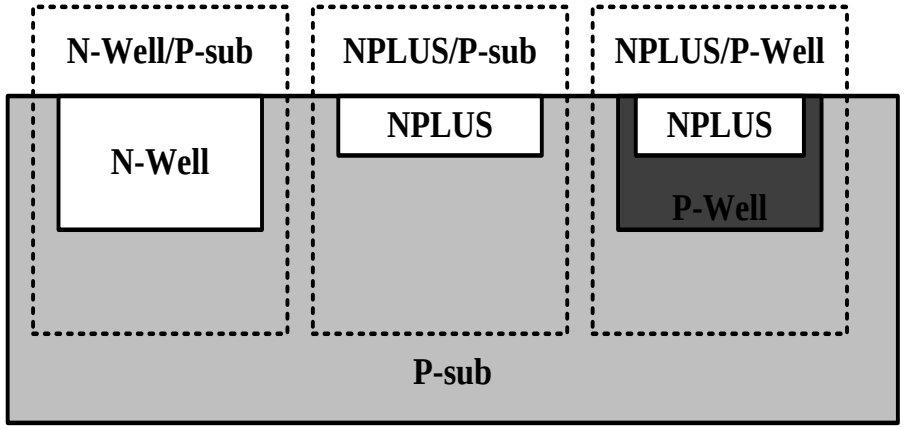


(a) (b)

PN结中的光电效应



光电二极管的实现



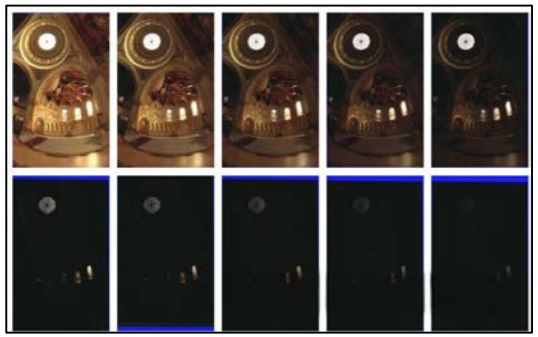
视觉图像传感器

2D 灰度信息 → 3D 深度信息 → 4D 时间信息 → 5D 多模信息

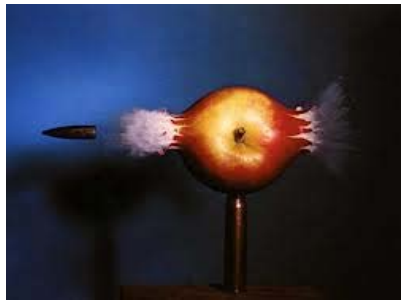
3亿9千万像素

高分辨率

宽动态范围



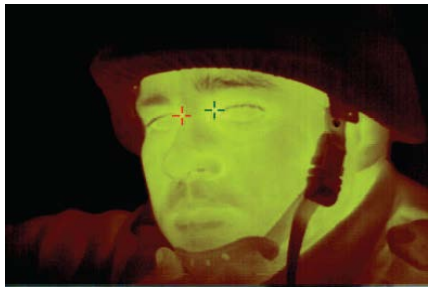
151dB
动态范围



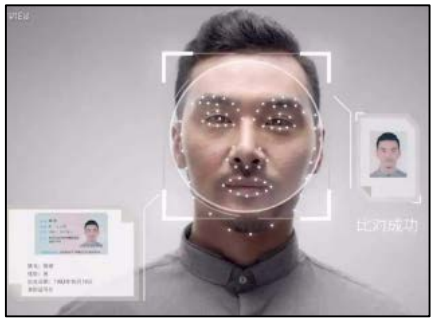
2千万帧/秒

高帧率

宽波长范围



200nm ~ 100μm



智能识别

高智能化

三维成像

2D/3D 成像兼容

高速图像传感器

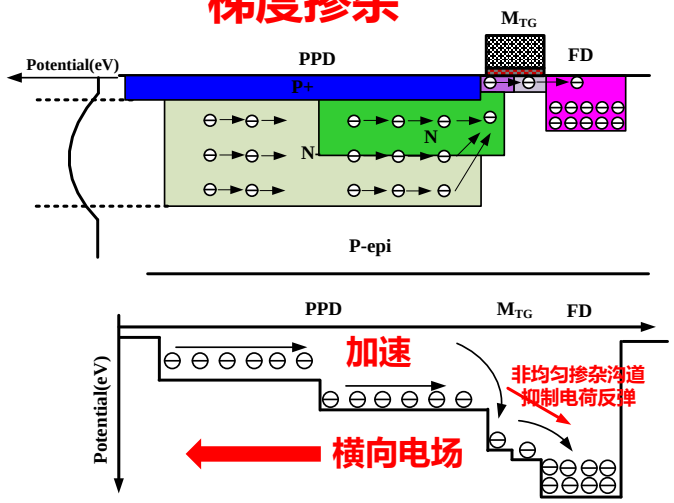
关键挑战

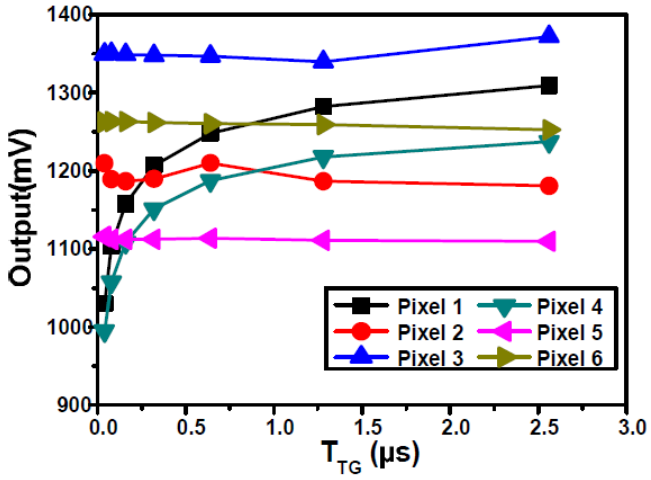
光电二极管面积大横向电场弱，电荷转移速度慢

解决方法

梯度掺杂像素结构，增强横向电场，加快光电荷转移速度。

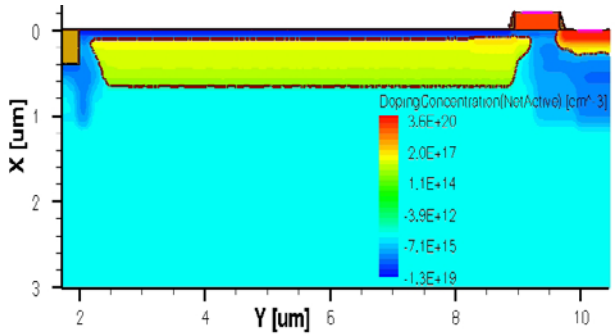
梯度掺杂



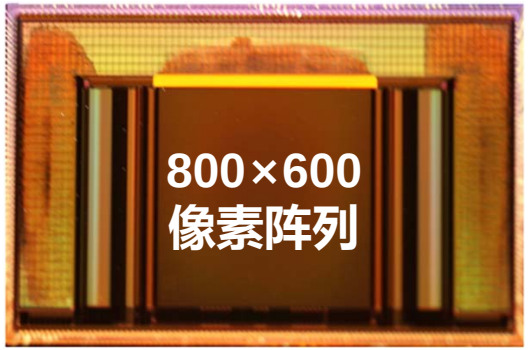


- **梯度掺杂像素：**
  - ✓ 转移时间 <40ns
- **已有方法：**
  - ✓ 转移时间 >1000ns

超高速图像传感器



梯度掺杂和梯度沟道的
超高速像素结构



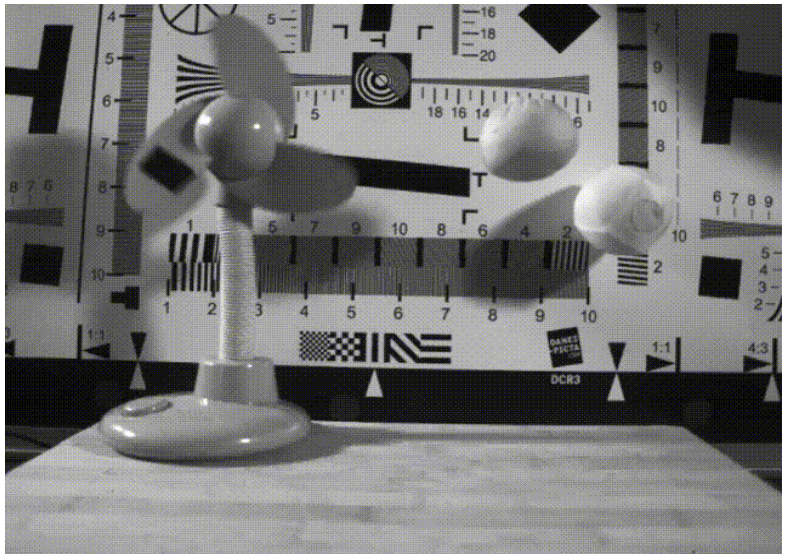
集成800×600图像传感器

- 1000帧/秒高速图像传感器

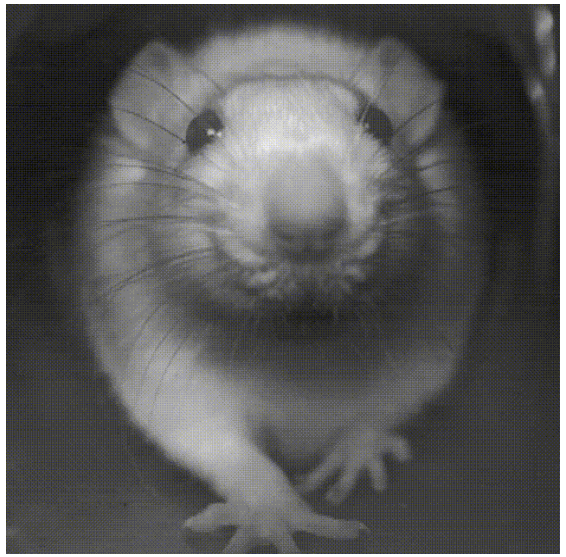
高速工业相机1000帧/秒

- 对标OnSemi LUPA1300

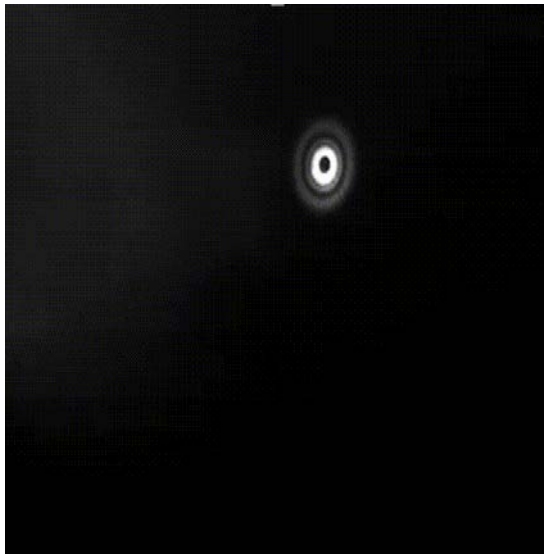
设计制造封装测试全自主可控



高速物体拍摄



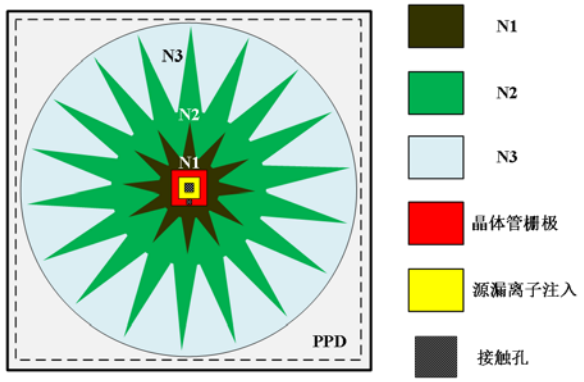
动物行为监测



物理相干环实验

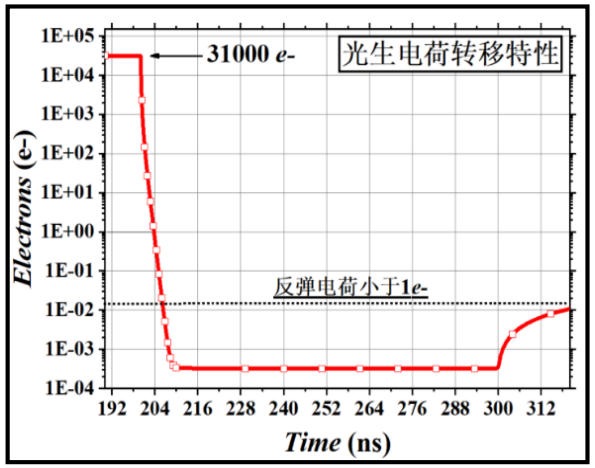
授权国家发明专利：ZL201410097892.1, ZL.201410836377.0; 美国专利：US9930284B2

超高速图像传感器



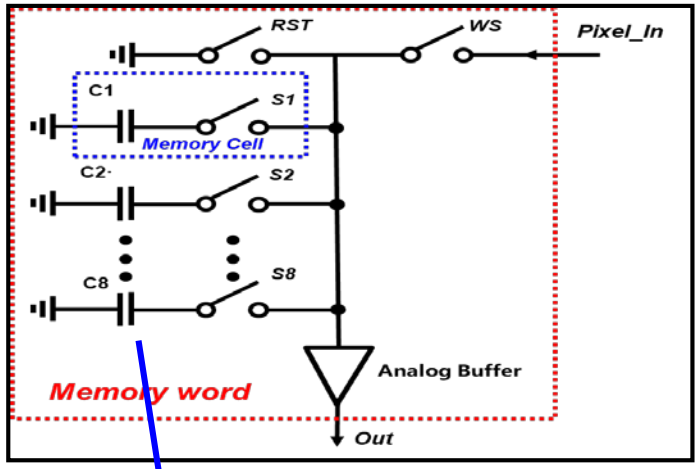
- 中心FD结构（缩短传输距离）
- PD梯度掺杂 （增强内建电势）
- PD掺杂形貌设计）（增强内建电势）

光电子收集时间
5ns以下

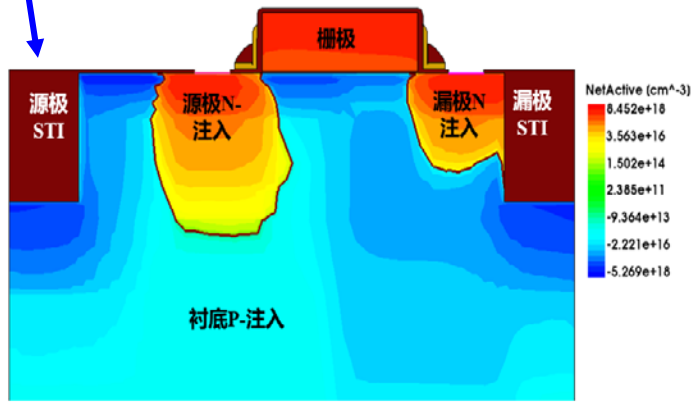


超高速大尺寸像素（PD 17μm）

- 授权发明专利：像素器件， ZL.202110323016.6.



基于开关晶体管界面调控的漏电抑制方法



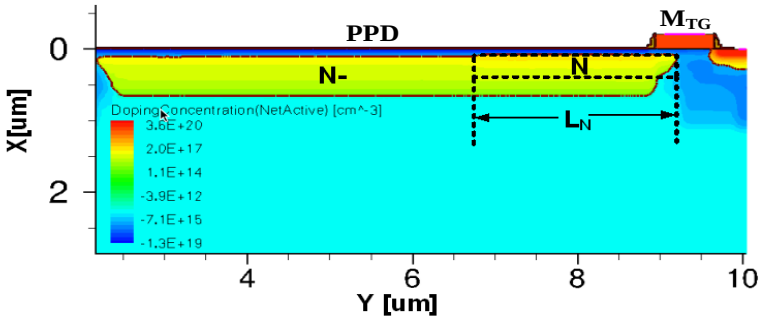
数据保持时间50ms以上，存储精度10bit

片上模拟存储

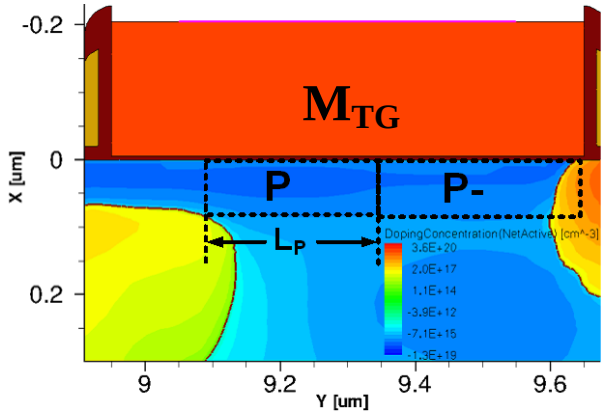
- 授权发明专利：采样开关...,ZL.202110311475.2.

超高速图像传感器

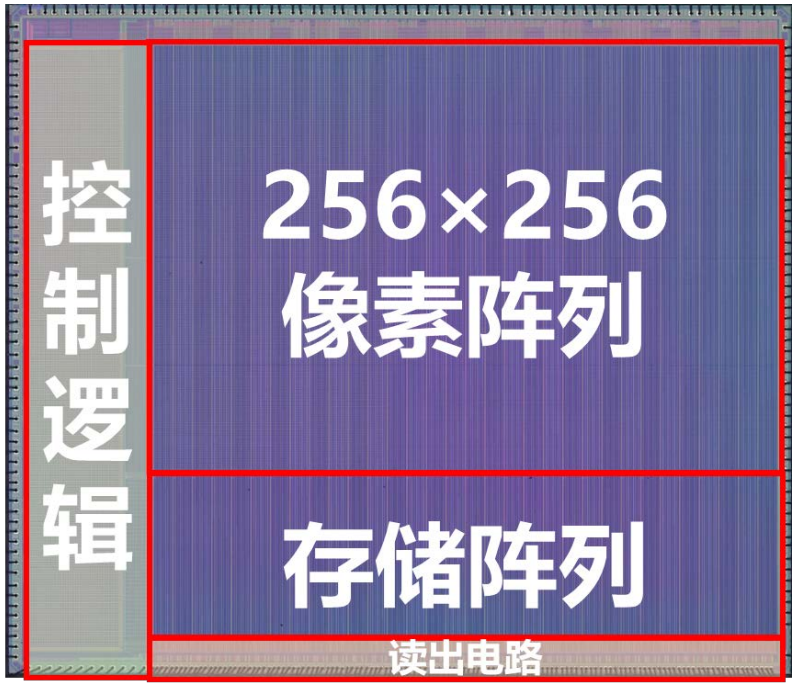
- 研制出超高速光电响应器件和高效光电传输晶体管
- 实现M帧/秒以上超高速CMOS图像传感器



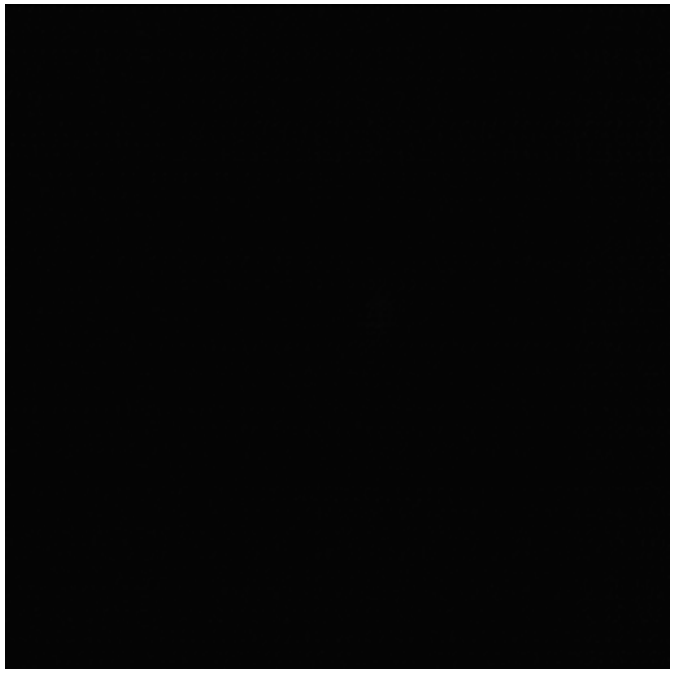
超高速光电响应器件



高效光电传输晶体管



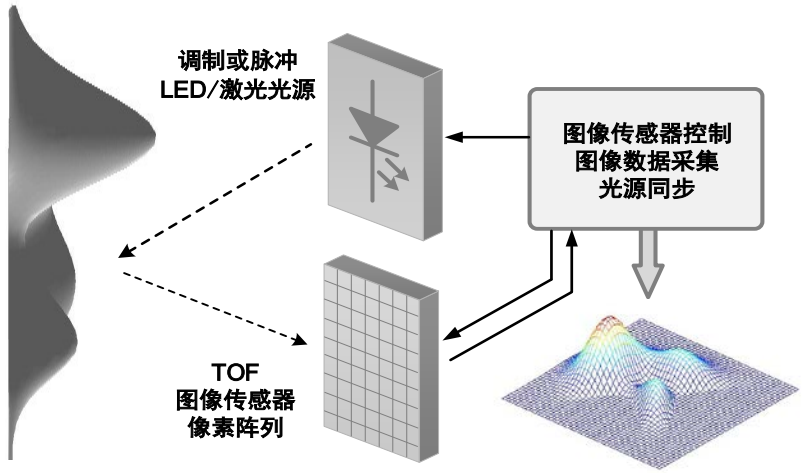
图像传感器
芯片显微照片

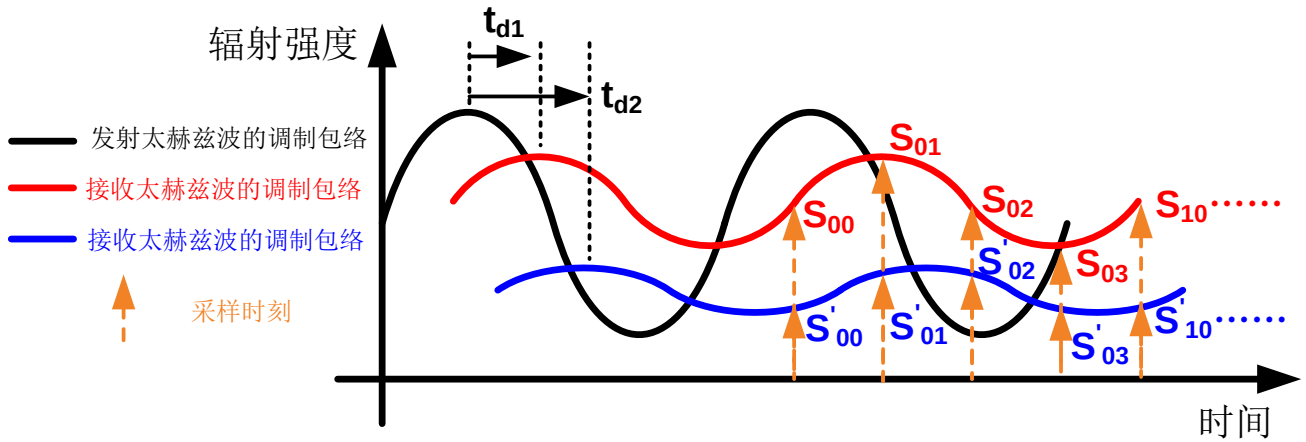


脉冲光源成像效果
帧率>2M

三维深度图像传感器-间接ToF

间接TOF





测量相位延迟以计算距离

$$D = \frac{ct_d}{2} = \frac{c\varphi_d}{4\pi f_m}$$

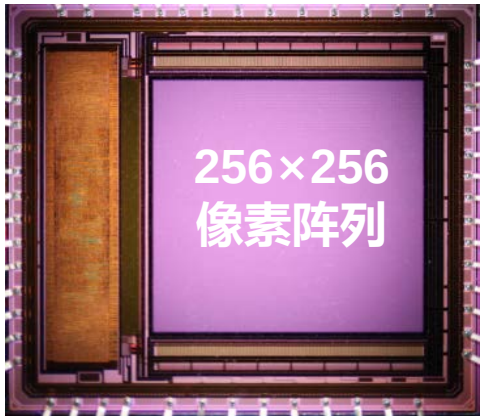
$$\varphi = \arctan\left(\frac{S_{03} - S_{01}}{S_{00} - S_{02}}\right)$$

$$D = \frac{1}{2} \times c \times \frac{\varphi}{2\pi} \times T_m$$

成像距离受发射光信号周期限制

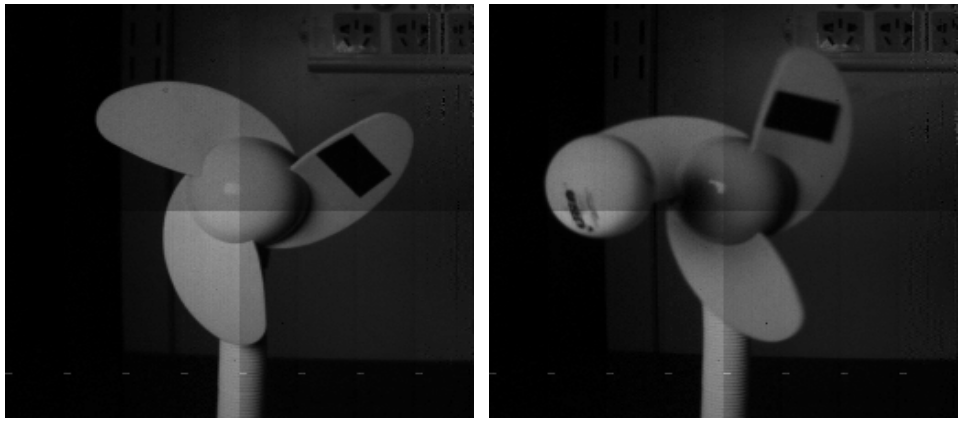
三维深度图像传感器（中国科学院半导体研究所）

256×256 TOF深度传感器

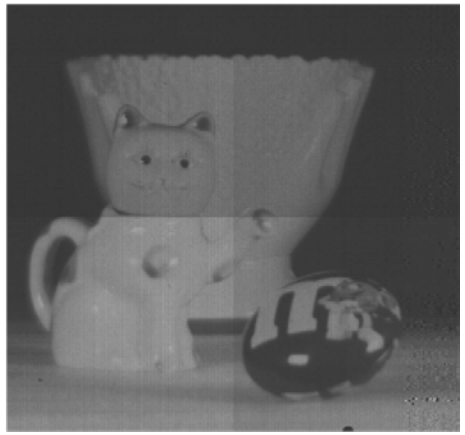


工艺条件	0.18 μm CIS
传感器分辨率	256 × 256
PPD结深	0.65μm
满阱电荷数目	30000
满阱传输时间	6 ns
n+掺杂注入能量	95 keV
n+掺杂注入剂量	1.2 e^{12}/cm^{-2}

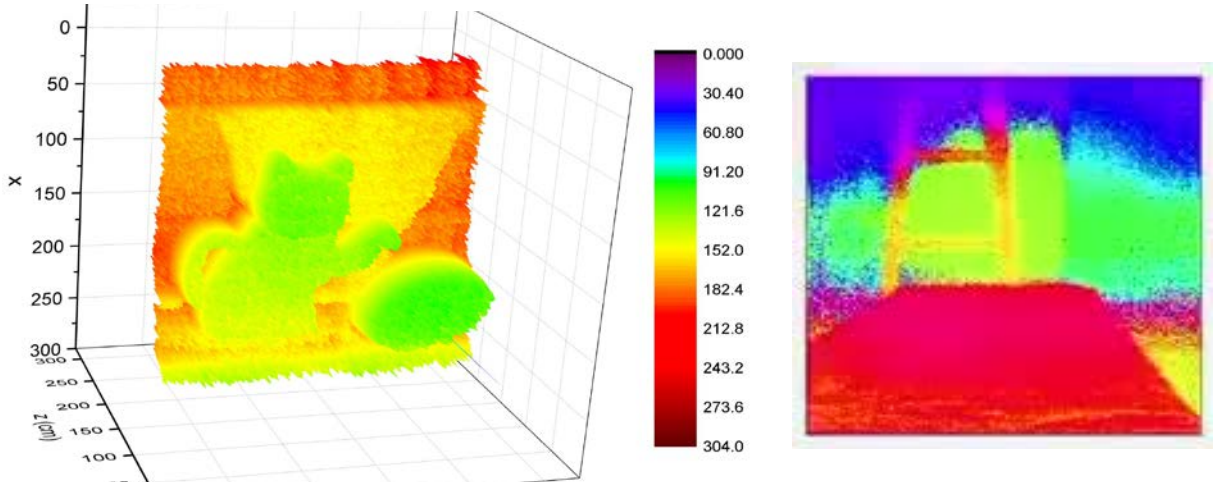
2D 高速成像 @430帧/秒



2D/3D 成像场景



3D 高速成像 @90帧/秒



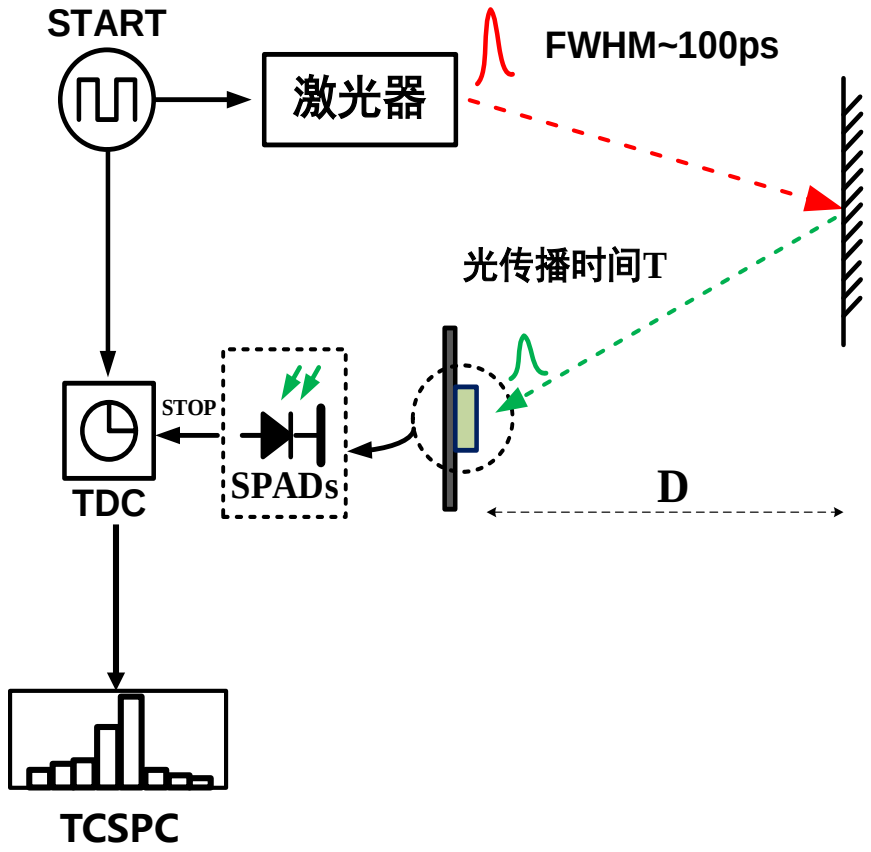
◆ Z. Chen, et.al Sci China Info Sci, 2016.

◆ 授权国家专利：201410754289.6；201910391897.8

三维深度图像传感器-直接ToF

D-TOF：直接飞行时间测量，通过检测激光器发射激光脉冲与像素检测到回波信号之间的时间差T，计算距离

$$d = \frac{cT}{2}$$



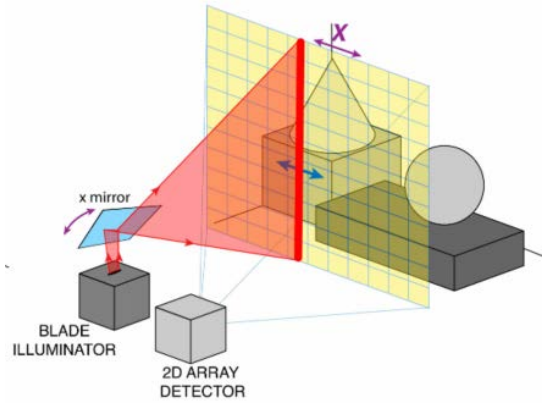
SPAD ： 单光子雪崩二极管，高灵敏度，高增益，雪崩时刻即代表光子到达时刻

TDC ： 将光子飞行时间信息转化为数字信息

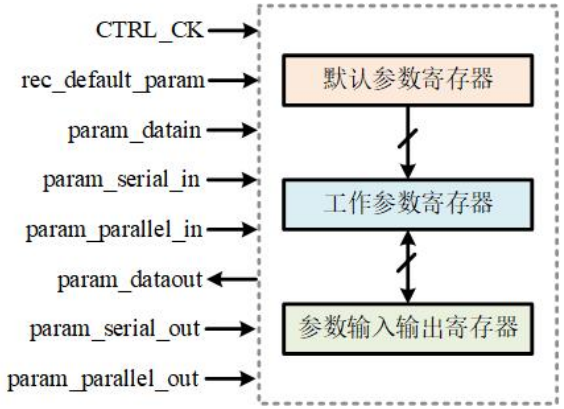
TCSPC: 时间相关单光子计数，通过对TDC测量结果进行直方图统计,过滤噪声干扰，得到有效信号

三维深度图像传感器-直接ToF

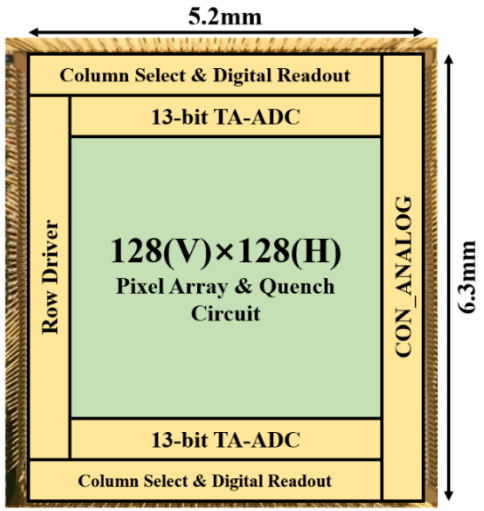
关键技术



线扫面收数字逻辑控制



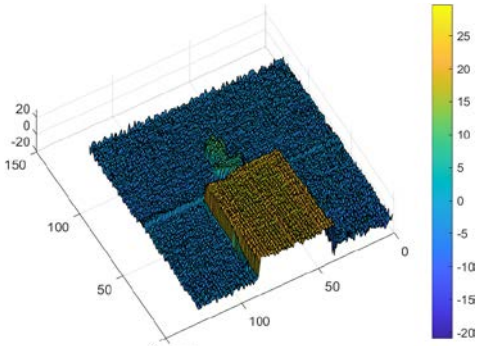
芯片实现



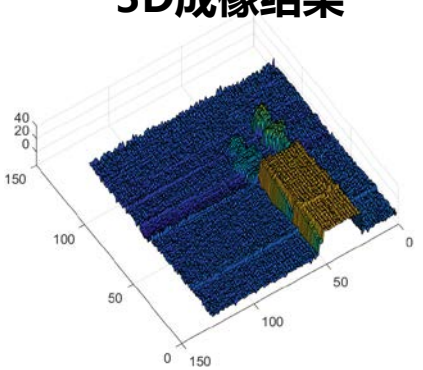
- 标准CMOS工艺
- 分辨率128×128
- 二维三维融合成像
- 线扫面收逻辑控制

成像结果

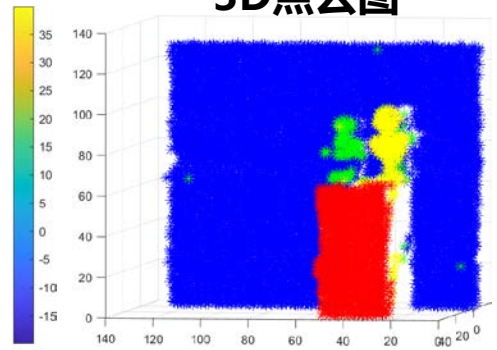
成像目标



3D成像结果

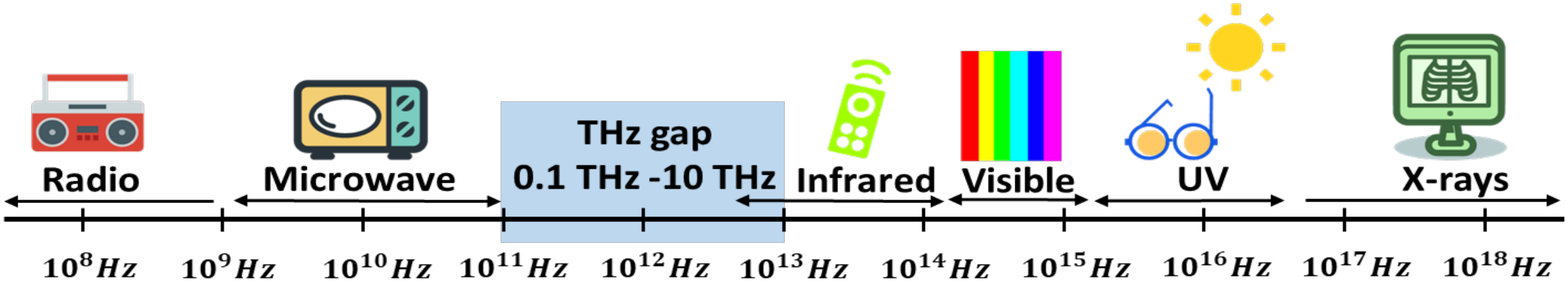


3D点云图



线扫面收激光雷达成像系统

太赫兹波图像传感器



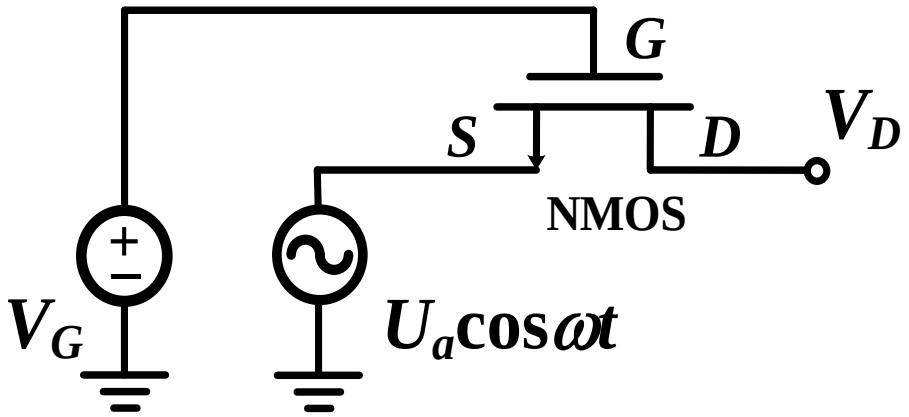
- 太赫兹波是一种电磁波，频率范围在0.1THz – 10THz

$$c = \lambda f$$ 真空中c≈3.0×10⁸m/s

- 太赫兹波的波长范围在3mm-30um

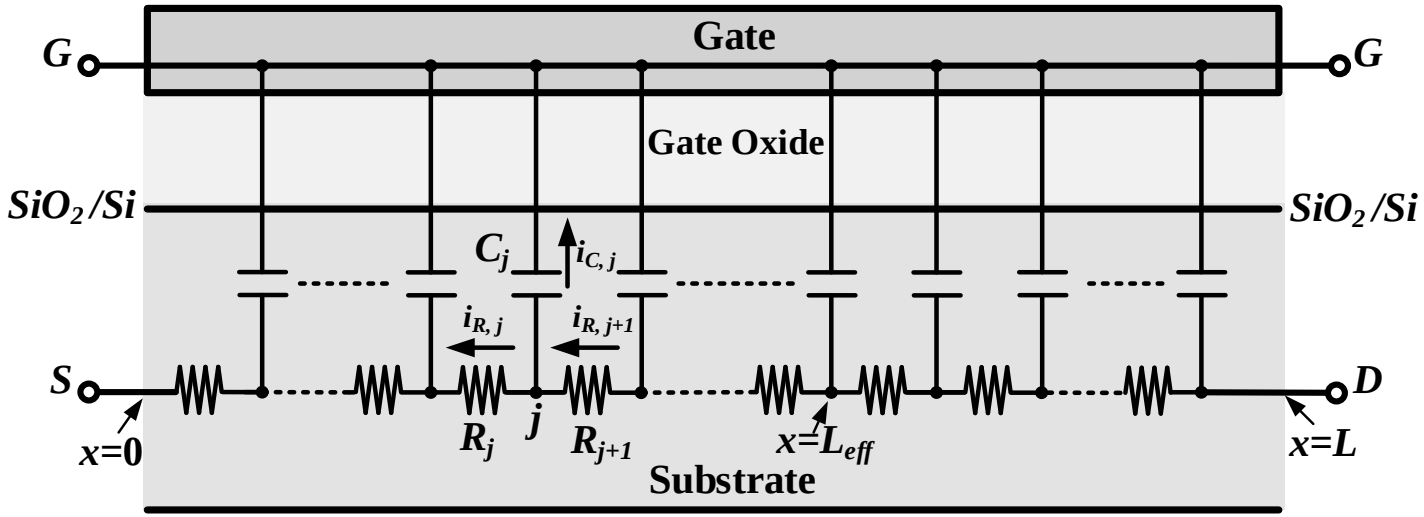
$$E = h\nu$$ 普朗克常数h≈6.63×10^{-34}Js

自混频功率探测



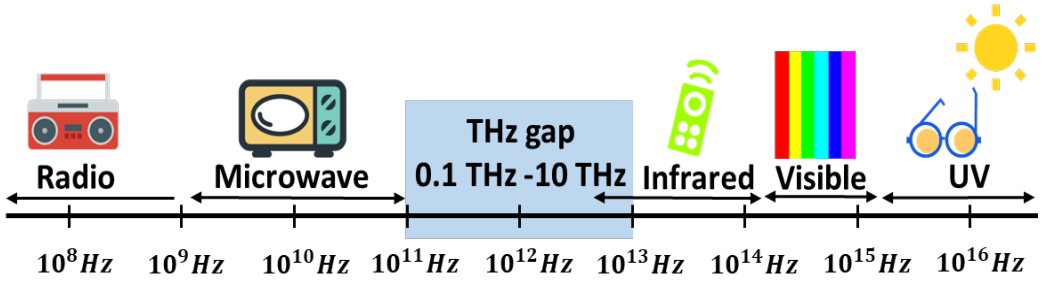
$$I(x,t) = WC_{ox}[V_G - V(x,t) - V_{TH}]\mu_n \frac{\partial V(x,t)}{\partial x}$$

$$\int_{x=0}^{L_{eff}} I(x,t_1)dx = -WC_{ox}\mu_n(V_G - V_{TH})U_a \cos\omega t_1 + WC_{ox}\mu_n U_a^2(\cos 2\omega t_1 + 1)/4$$

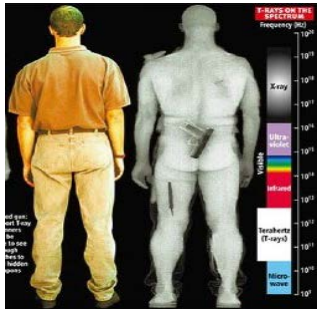


太赫兹图像传感器 （中国科学院半导体研究所）

CMOS太赫兹波探测



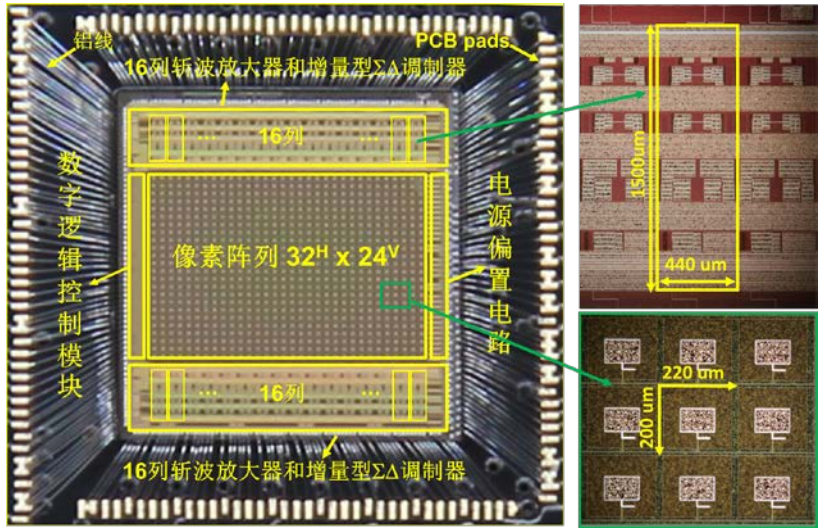
宽光谱成像应用

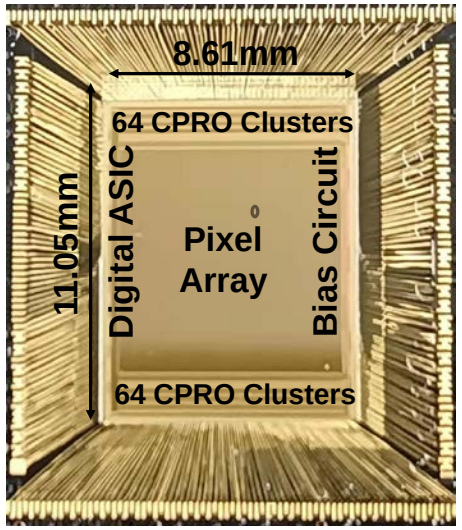


非侵入式探测

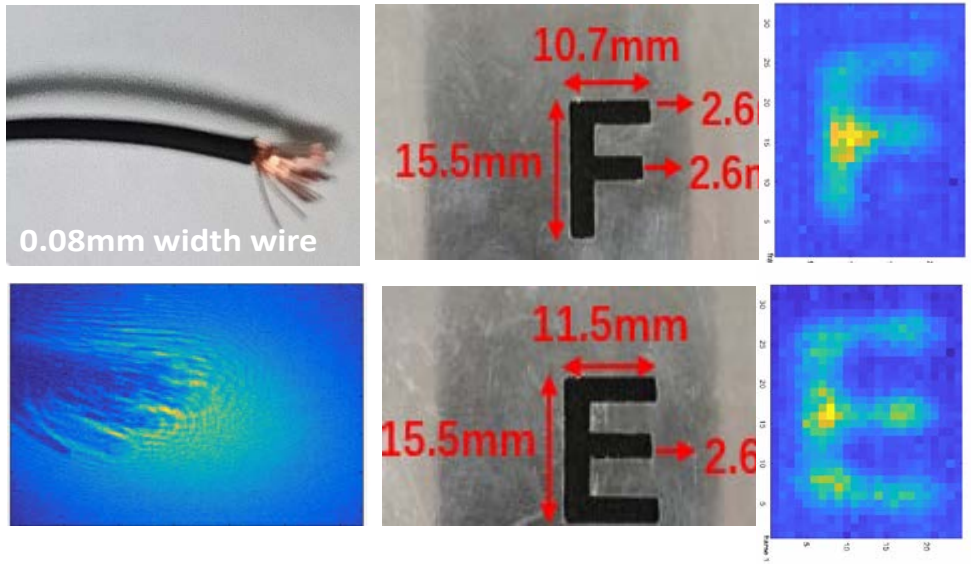
透视成像

像素阵列集成





信封中透视金属物体

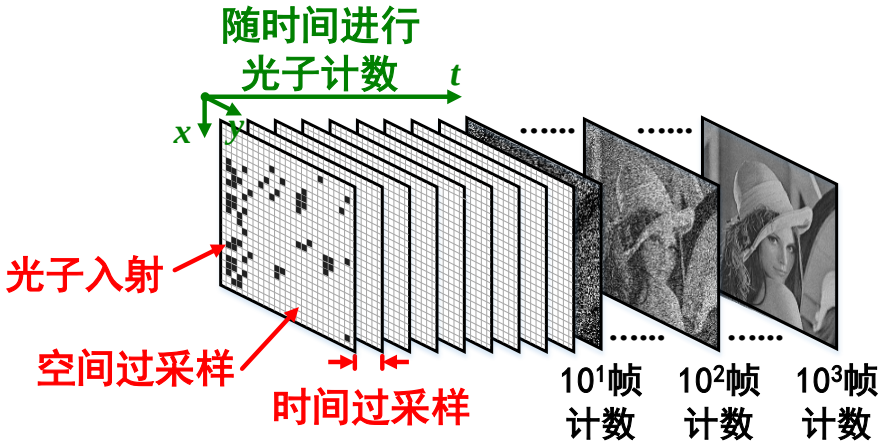


- Liu Min, et al. IEEE ISSCC, 2023.（集成电路领域顶级会议）
- JSSC 2024(集成电路领域顶刊)、半导体学报十大进展

- 授权国家专利：202111258855.0；202111258854.6

多模式图像传感器 （中国科学院半导体研究所）

基于光子计数型图像传感器

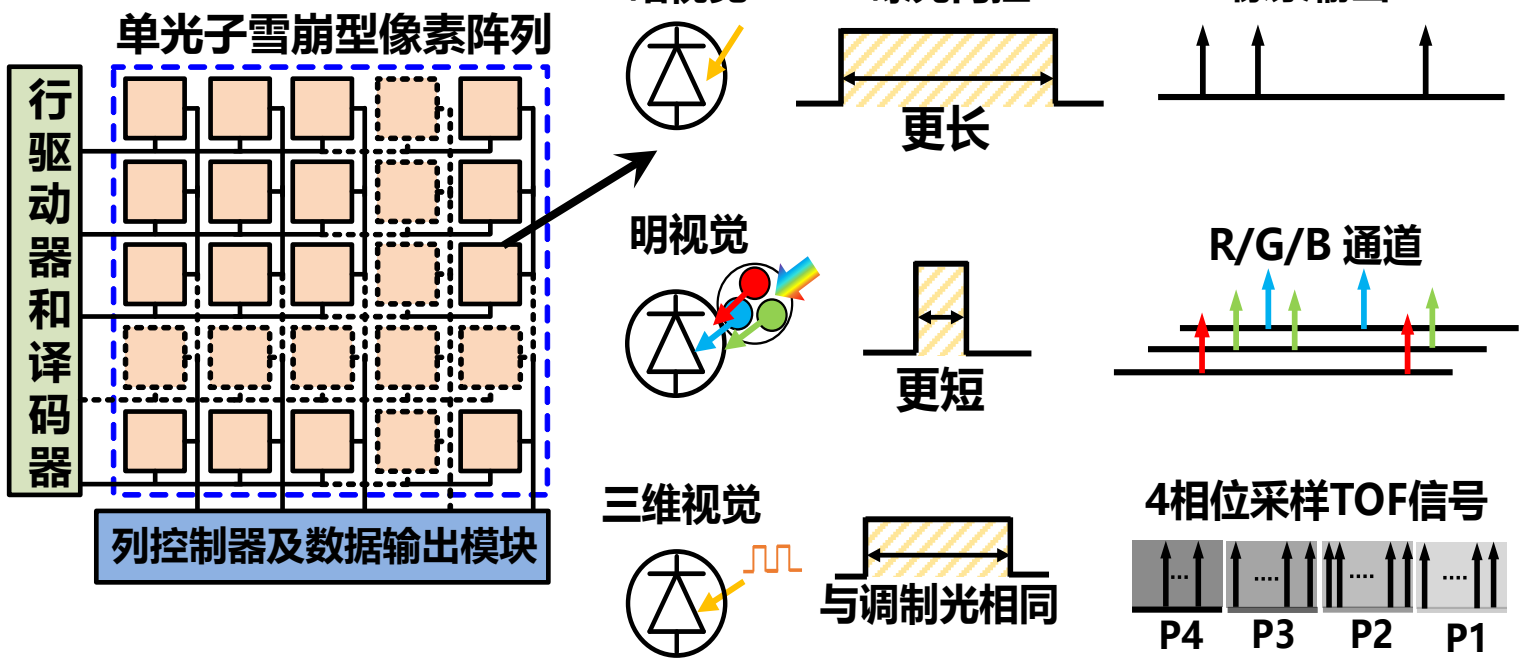


- 光子级灵敏度
- 光子计数成像
- 飞行时间测量
- 脉冲编码输出

- 高动态范围
- 灰度成像
- 深度成像
- 小数据量

单芯片多维度信息感知

单光子脉冲图像传感器 可配置曝光门控的多模式成像



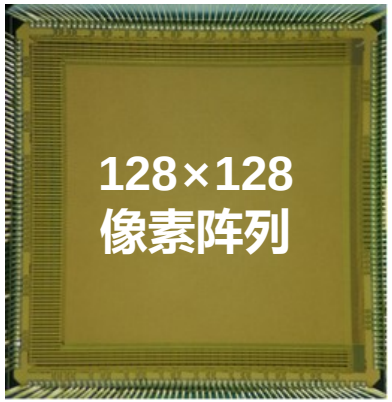
创新点:

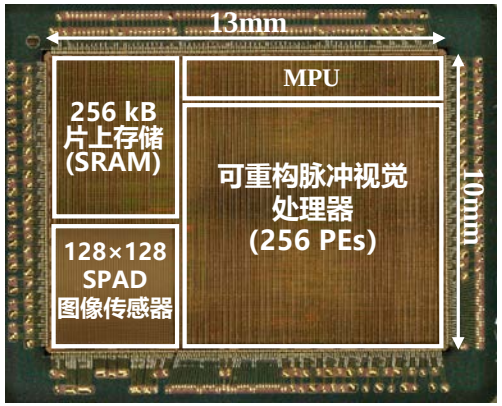
1）可配置门控实现 (a) 二维成像 (b) 三维成像 (c) 暗光成像

2）模仿视网膜的视锥细胞和视杆细胞实现彩色和高灵敏成像

多模式图像传感器（中国科学院半导体研究所）

单光子图像传感器芯片照片

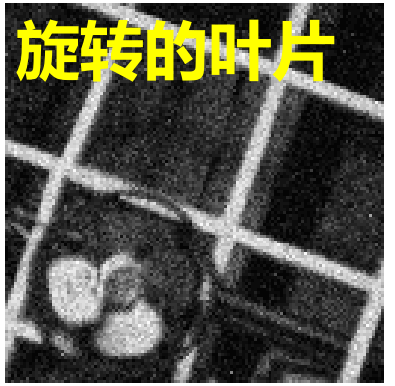




加工工艺	CMOS 180nm
系统时钟频率	80 MHz
传感器分辨率	128×128
帧率	100kfps
PE个数×并行度	256×4
片上存储	256 KB
峰值算力	81.9 GSOPS

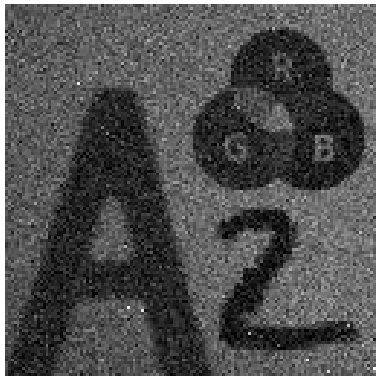
测试系统

成像结果

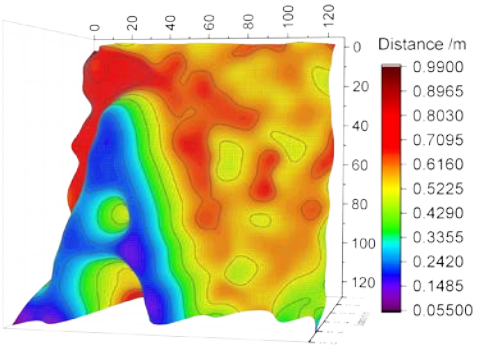


高速视觉

二维彩色视觉



弱光视觉
(1lux)



三维深度视觉
(最大探测距离15m)

◆ Xu Yang, et al. IEEE JSSC, 2024.（集成电路领域顶级期刊）

◆ 授权国家专利：202111125522.0；202310104895.2

内容提纲

- 视觉芯片研究背景
- 视觉芯片研究成果
  - 视觉图像传感器
  - 智能图像处理器
  - 感算一体视觉芯片
- 视觉芯片应用案例

智能图像

计算机视觉算法

输入图像

特征提取
LBP、HoG
SIFT、SURF

Features

特征分类
SVM
Adaboost

手工选取特征，可解释性强
准确率一般
计算量较小

(a) 传统的计算机视觉算法

多层神经网络
卷积、激活、池化、全连接

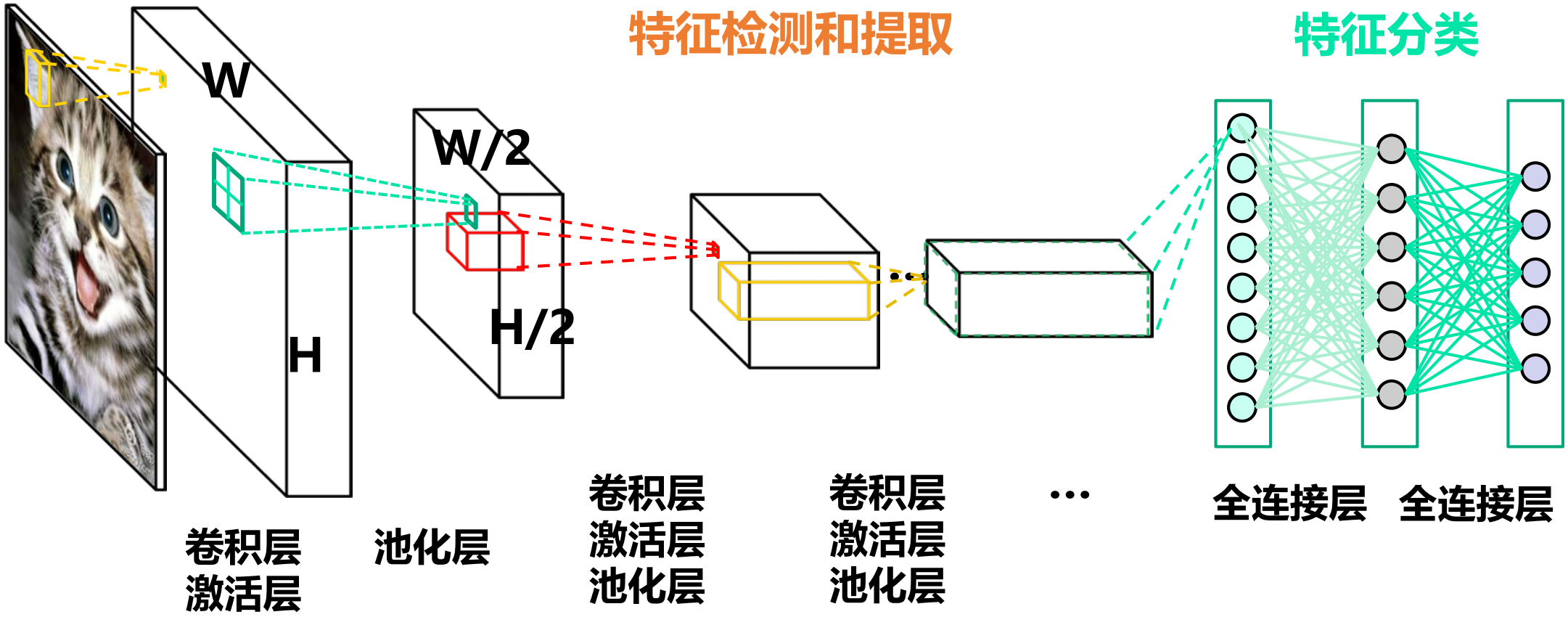
End to end模型，数据驱动
模型准确率高
需要大量数据训练、计算量大

分类结果

输出结果

(b) 基于深度学习的计算机视觉算法

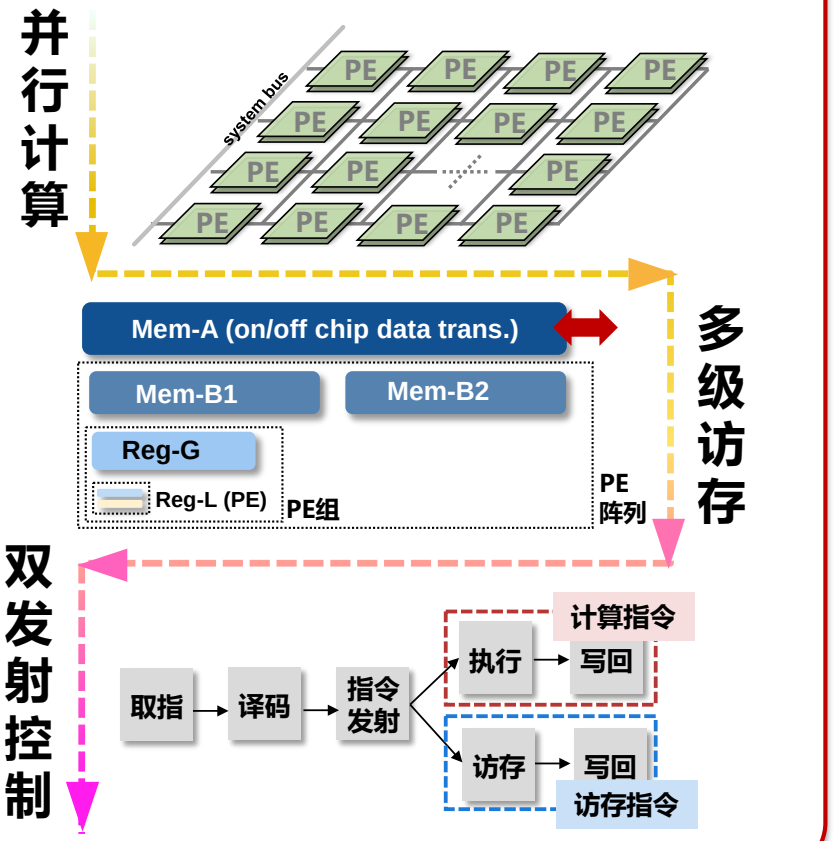
深度学习算法


特征检测和提取
特征分类
W
H
W/2
H/2
卷积层
激活层
池化层
卷积层
激活层
池化层
卷积层
激活层
池化层
…
全连接层
全连接层

智能图像处理器

提出可编程智能处理器架构，兼容支持计算视觉处理和神经网络处理的功能。

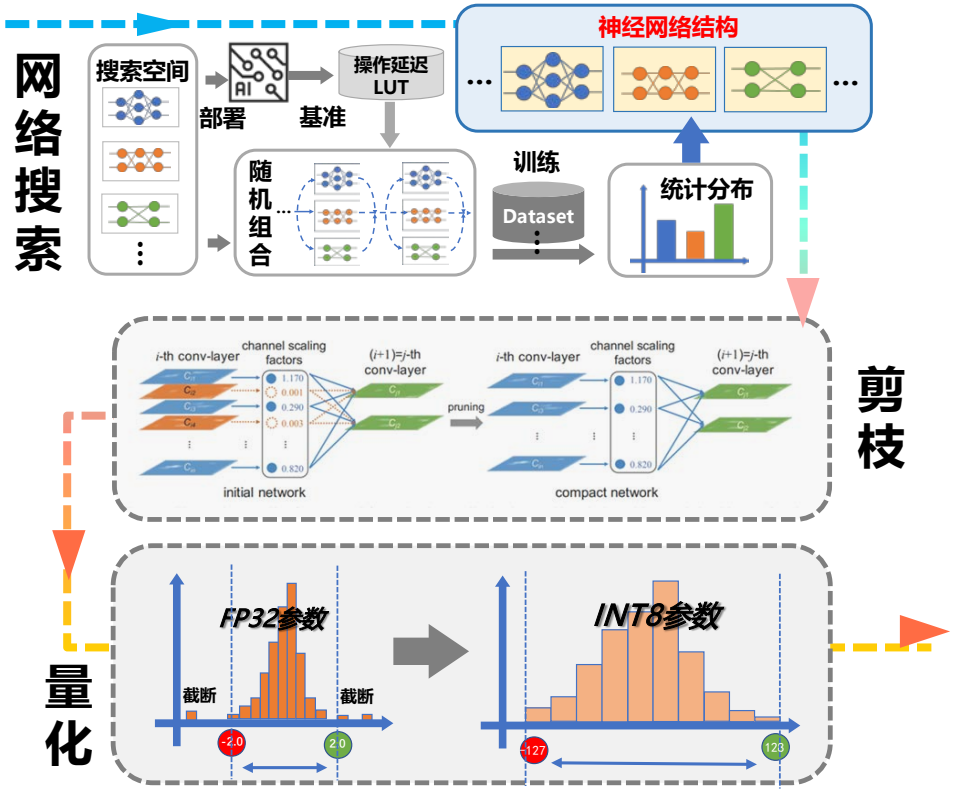
硬件架构和电路



协同设计

领域专用

软件算法和部署



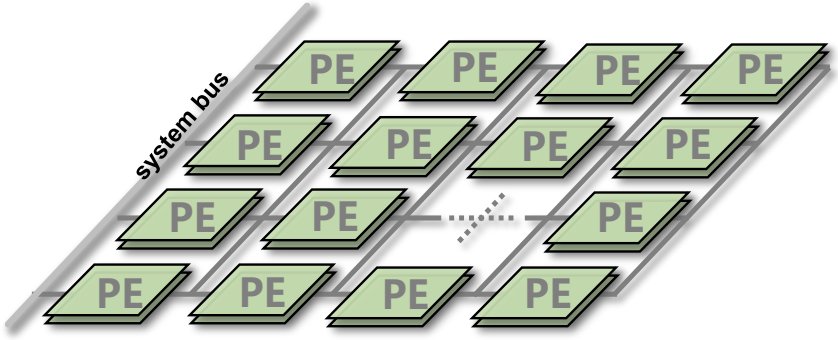
新型计算架构、访存方式、控制方式
提高硬件算力

→ 高能效计算 ←

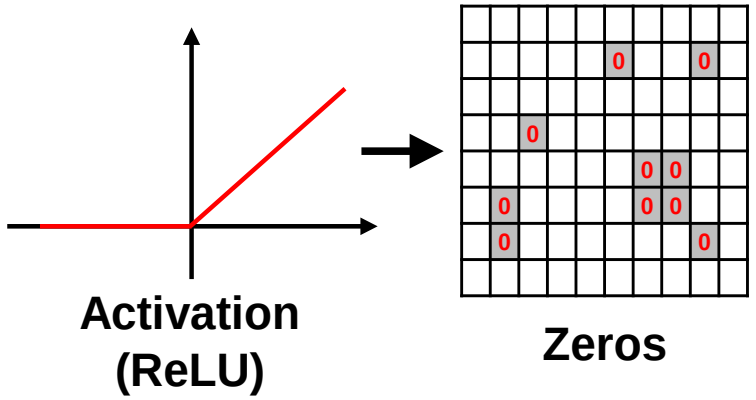
新型神经网络算法、轻量化方法
减小计算复杂度

高能效智能图像处理器架构

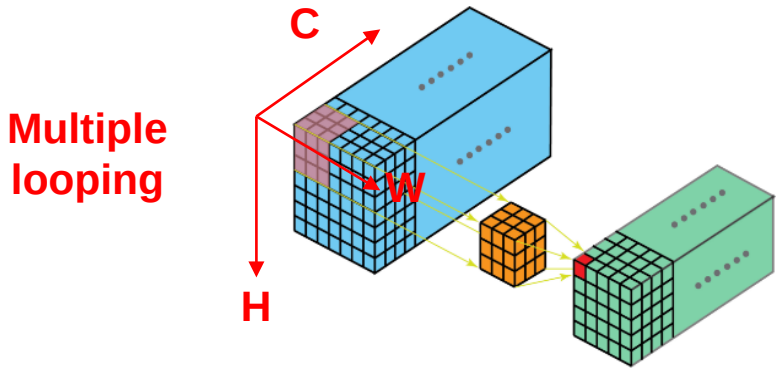
I. 并行计算



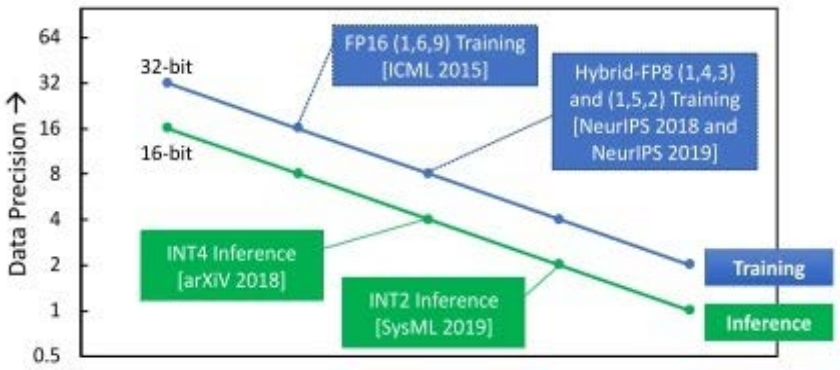
II. 数据稀疏性



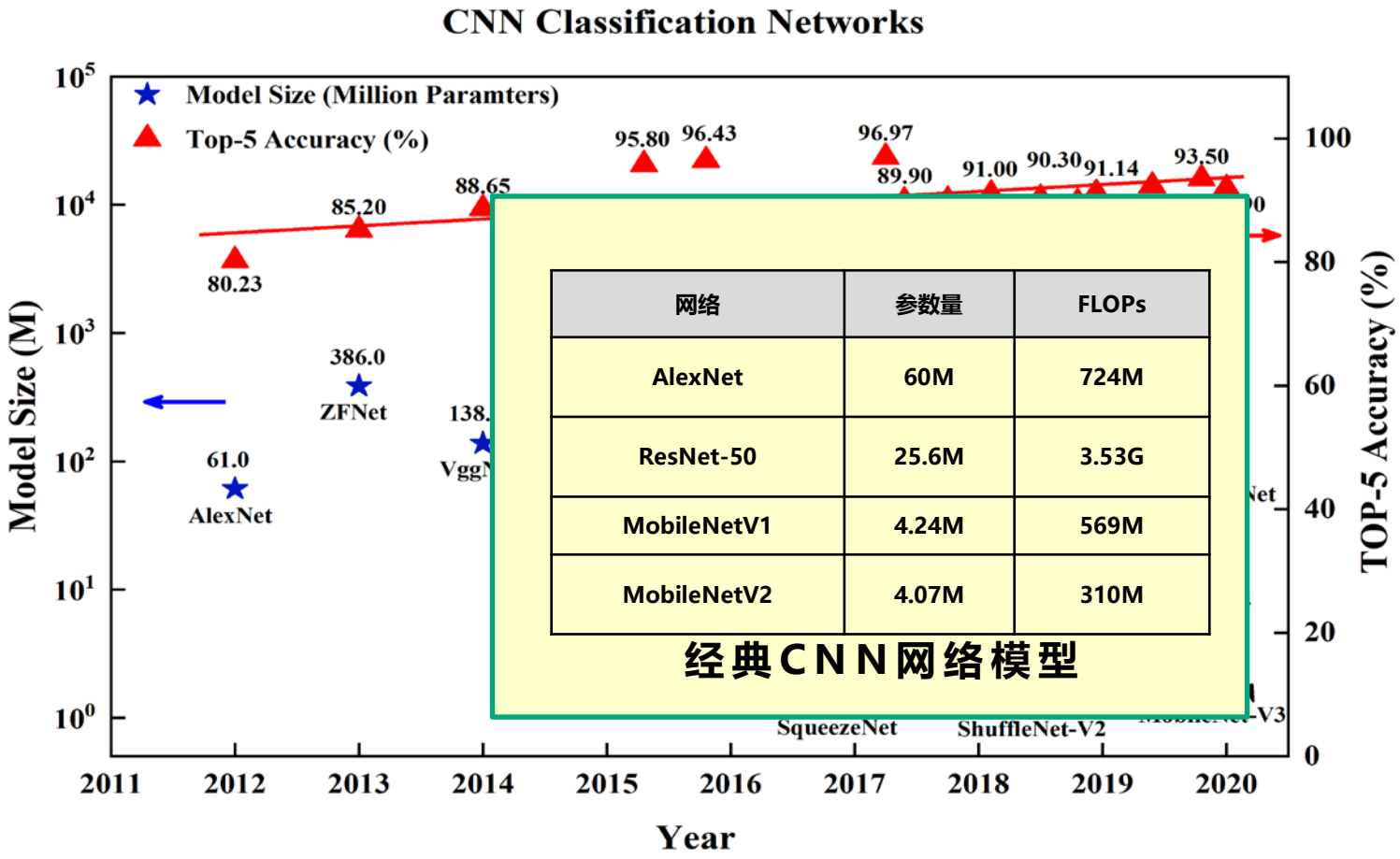
III. 数据复用



IV. 多精度计算



轻量化的智能图像算法

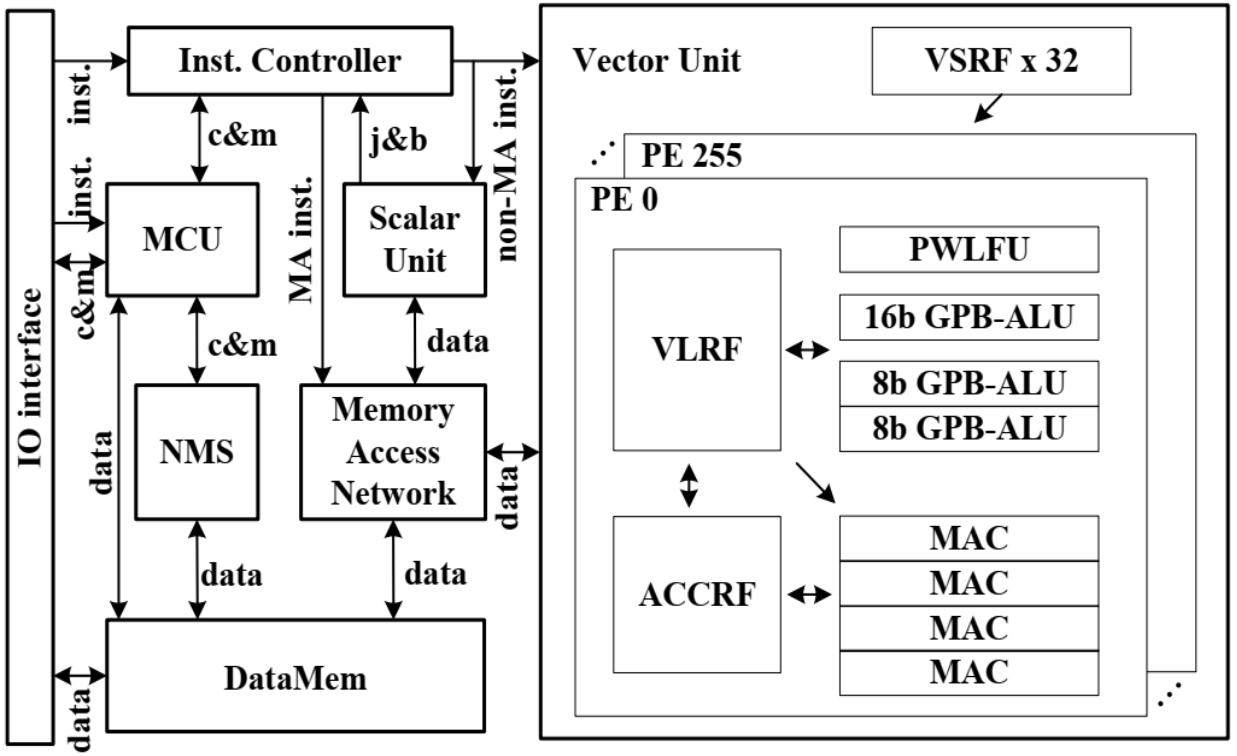


网络	参数量	FLOPs
AlexNet	60M	724M
ResNet-50	25.6M	3.53G
MobileNetV1	4.24M	569M
MobileNetV2	4.07M	310M

经典CNN网络模型

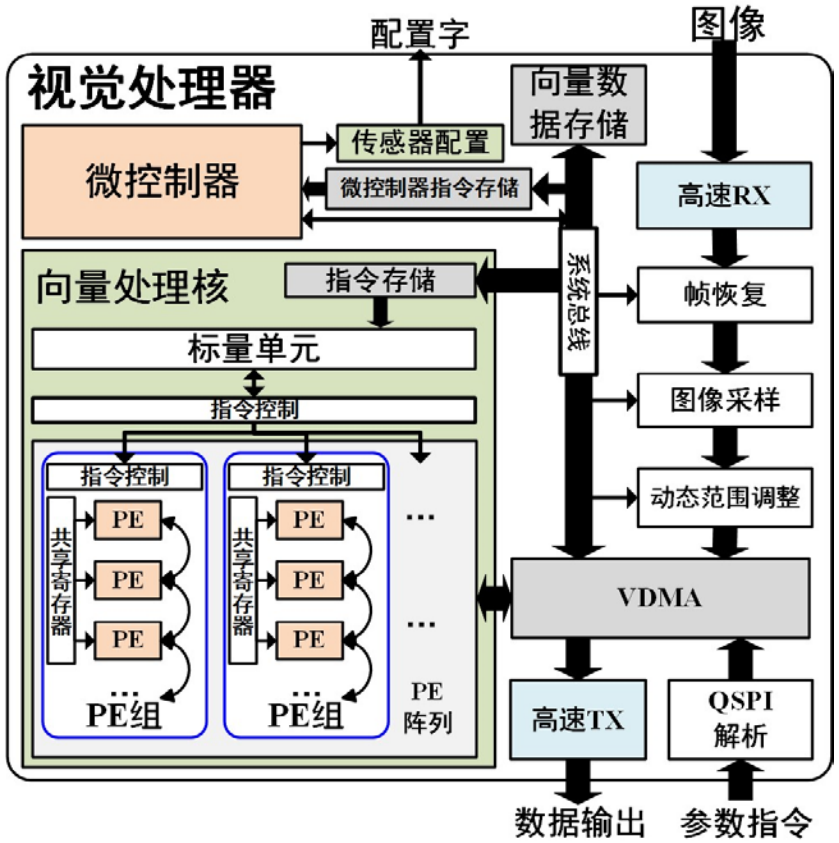
从经验上来讲：MobileNet或以它为基础的网络是参数数量和处理精度平衡的较好的网络，如果经过仔细的稀疏化和剪枝处理它适合边缘处理

高能效智能图像处理器



inst. : instruction　　c&m : control and monitor　　j&b: jump and branch

- 主处理器：256个 PE 阵列
- 片上存储：2MB~10MB
- NMS处理：非极大值抑制电路
- 访存网络：支持灵活快速访存
- 双 发 射：计算和访存指令
- 数据重用：以减少访存次数

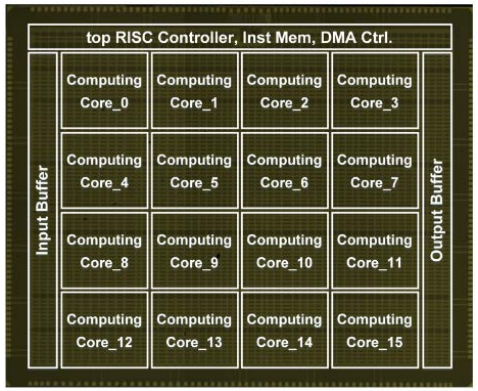


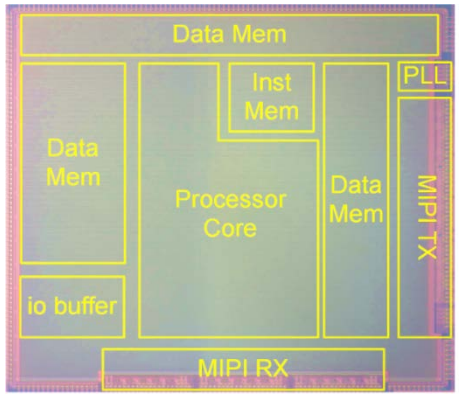
创新点：

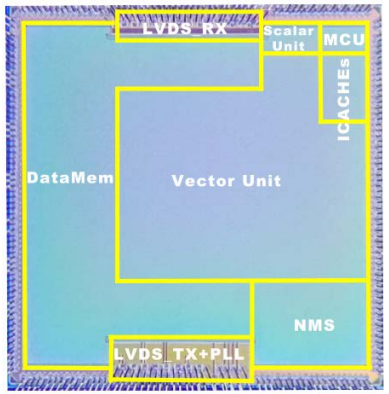
- 可编程PE并行阵列
- 集成图像信号处理器
- 可实现二维彩色/三维ToF图像处理
- 9.6Gbps数据吞吐率

智能图像处理器芯片（中国科学院半导体研究所）

智能视觉处理器芯片



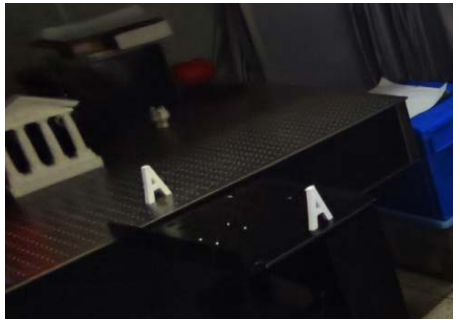


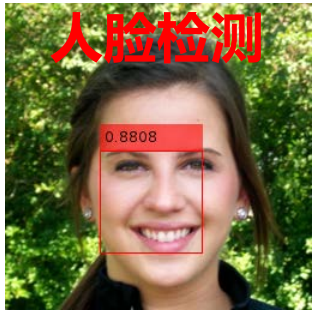


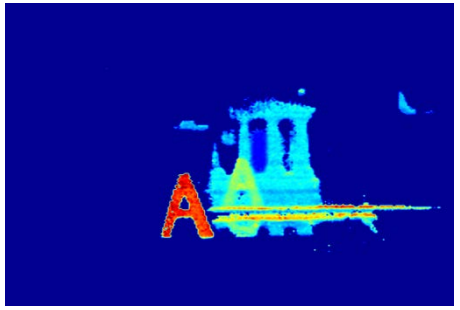
工艺	65nm	55nm	28nm
存储	1.2MB	4.5MB	2.4MB
能效	0.64TOPS/W	1.15TOPS/W	2.3TOPS/W
功耗	~1.0W	~0.36W	~1.0W

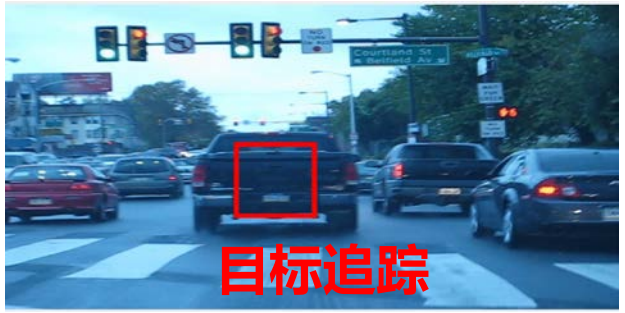
* TOPS/W 万亿次操作/秒瓦

三维场景重建　　智能化处理









1) 1080p高清二维图像实时智能处理；
2) 480p三维深度视觉图像场景重建；
3) 算法完全片上处理，无需外部存储。

◆ IEEE TCAS-I (2023), IEEE TCAS-II (2022,2023), ASSCC (2024) ◆ 授权国家专利：202210245401.8; 202311532751.3

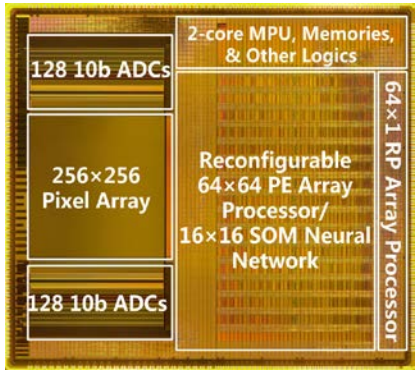
内容提纲

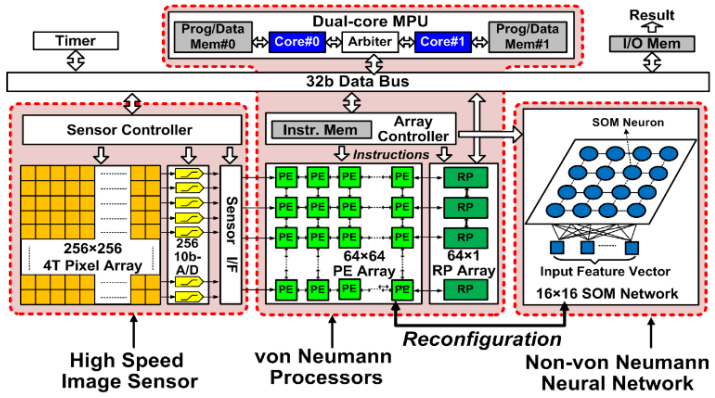
- 视觉芯片研究背景
- 视觉芯片研究成果
  - 视觉图像传感器
  - 智能图像处理器
  - 感算一体视觉芯片
- 视觉芯片应用案例

单片集成传感处理功能视觉芯片

单片集成传感处理功能视觉芯片（JSSC 2014）

实现全球首款单片集成人工智能视觉系统芯片，单芯片集成高速图像传感器、异构多级并行处理器，类似人脑的全局判断和局部认知处理能力，实现1000帧/秒高速视觉图像获取和处理。

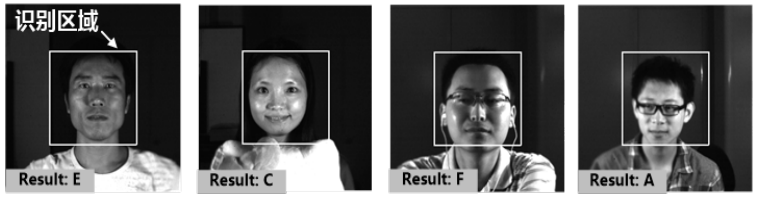


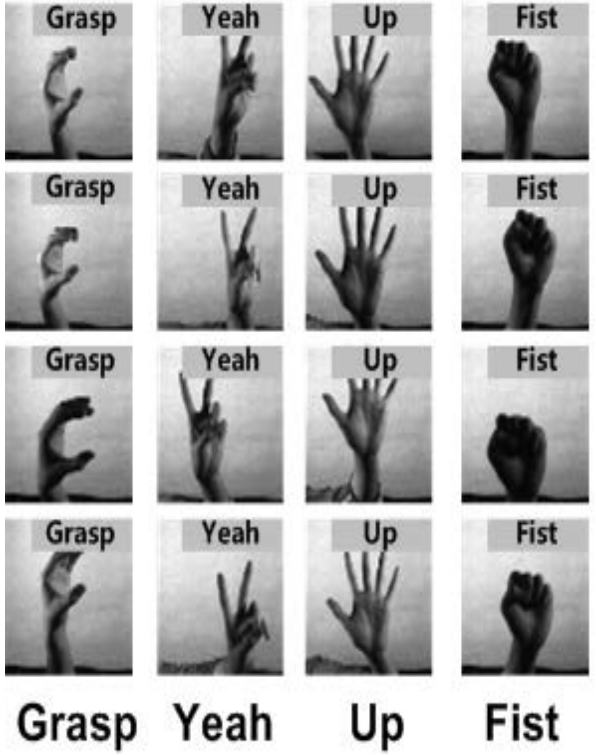


运动目标跟踪结果

人脸识别训练图像

人脸识别测试结果





可达1176fps系统级性能，识别率86%

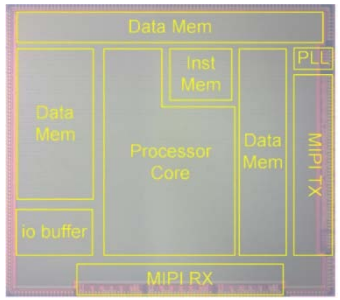
◆ IEEE JSSC 2014，ISSCC 2014.（集成电路领域顶级期刊）

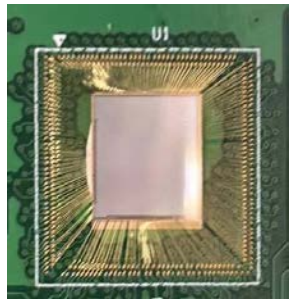
二维/三维兼容堆叠式感存算视觉芯片

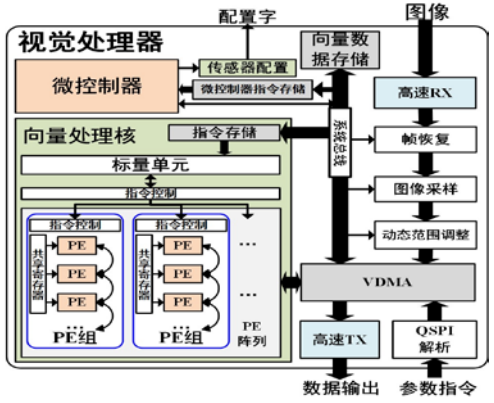
二维/三维兼容的堆叠式感存算视觉芯片（TCAS-I 2023）

首次实现二维/三维兼容感存算一体视觉芯片，采用三维堆叠技术实现高性能图像传感器、二维/三维兼容智能处理器一体化集成，处理器提出左右脑时分重构架构，兼容支持计算视觉和神经网络处理，**实现精确深度计算和图像智能识别的兼容处理。**

二维/三维兼容智能处理器芯片（55nm CMOS工艺实现）

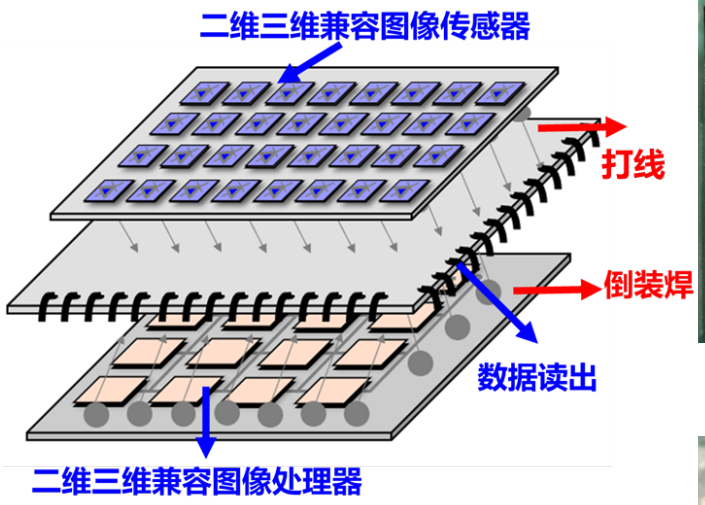


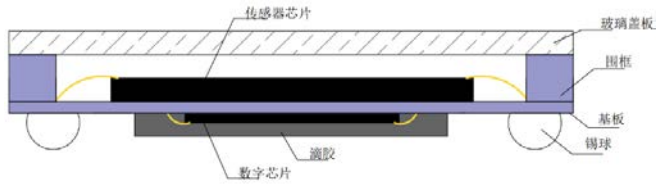




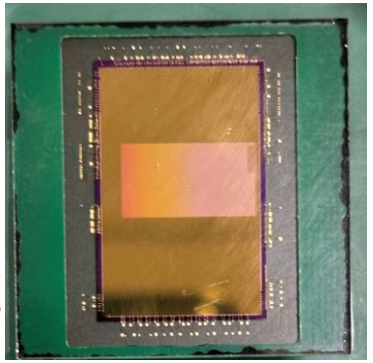
◆ IEEE TCAS-I 2023.

三维堆叠视觉芯片封装原理示意图





视觉芯片封装照片(顶层)



图像获取和实时智能检测

视觉芯片封装照片(底层)

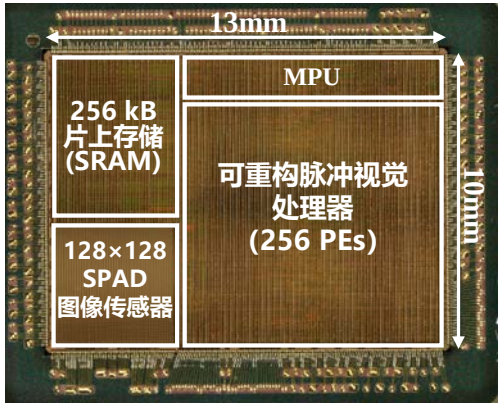
实时演算出三维深度图

单光子全脉冲仿生视觉芯片

基于单光子成像的全脉冲仿生视觉芯片（JSSC 2024）

首次提出仿生脉冲视觉芯片，实现全脉冲的视觉信息获取、预处理、智能推理。

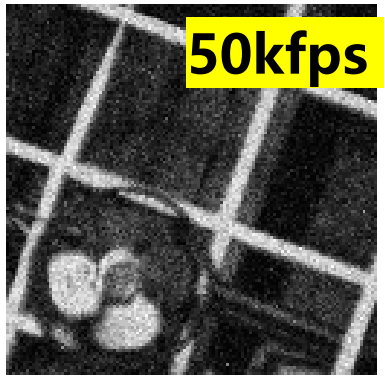
芯片照片



加工工艺	CMOS 180nm
系统时钟频率	80 MHz
传感器分辨率	128×128
帧率	100kfps
PE个数*并行度	256*4
片上存储	256 KB
峰值算力	81.9 GSOPS

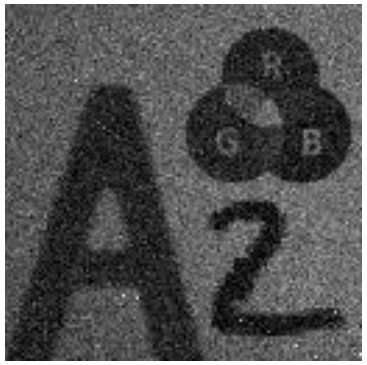
◆ IEEE JSSC 2024.

成像结果

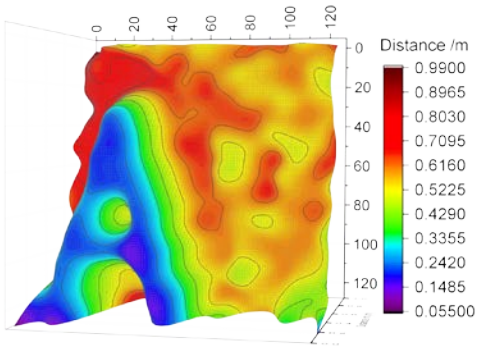


高速视觉

二维彩色视觉

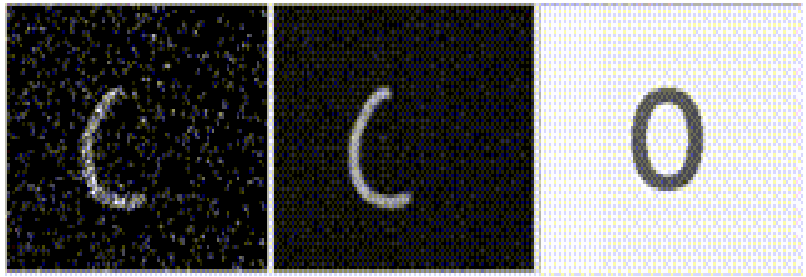


弱光视觉
(1 lux)



三维深度视觉
(最大探测距离15m)

手写数字实时目标识别

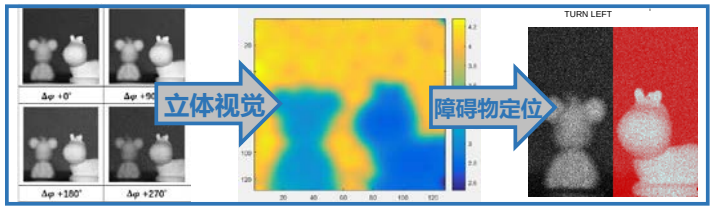


脉冲图像　灰度图像　识别结果

二维/三维双通路视觉处理

“what”通路

“where”通路

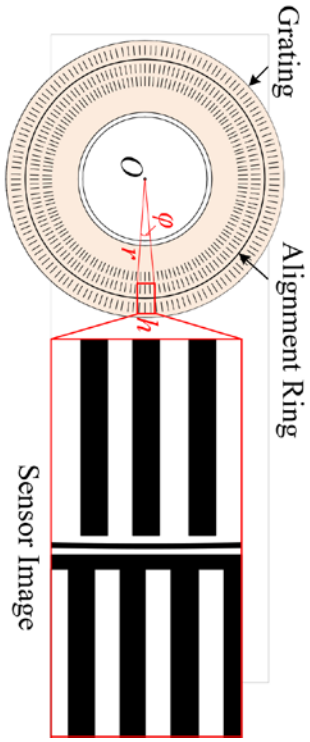


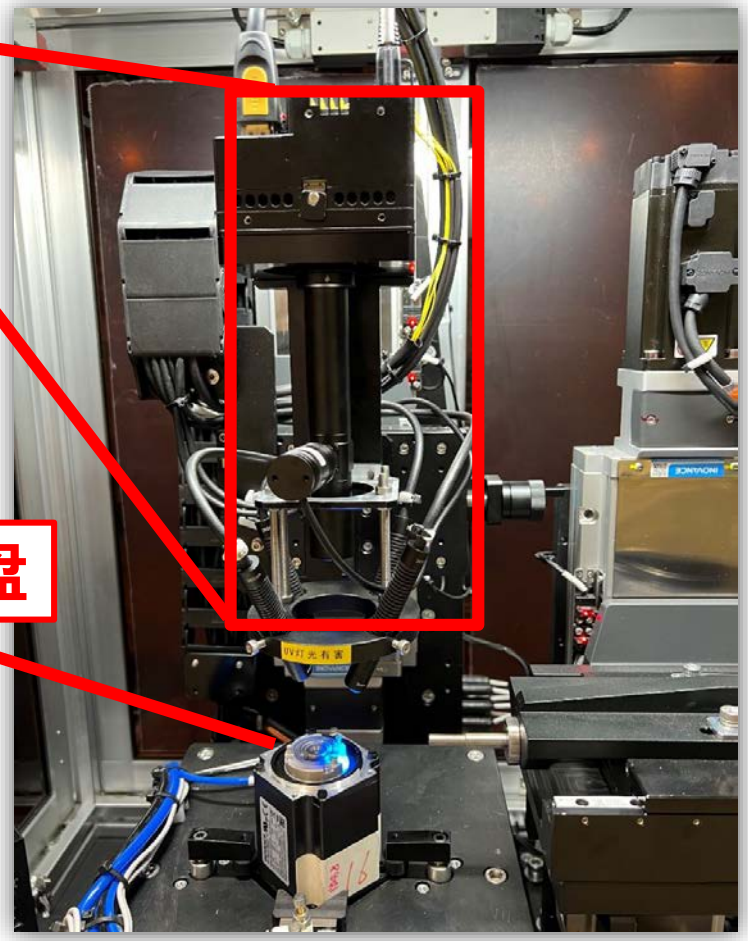
内容提纲

- 视觉芯片研究背景
- 视觉芯片研究成果
- 视觉芯片应用案例

高速智能工业相机及模组

应用案例一：码盘高速智能检测系统





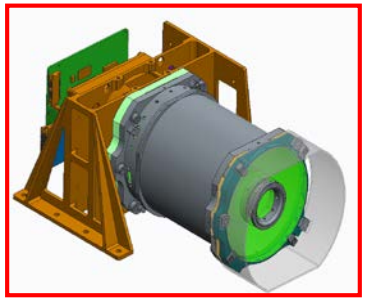
分辨率：1920×1080　　接口：EtherCat/CL

帧速率：200fps　　尺寸：80×60×50mm

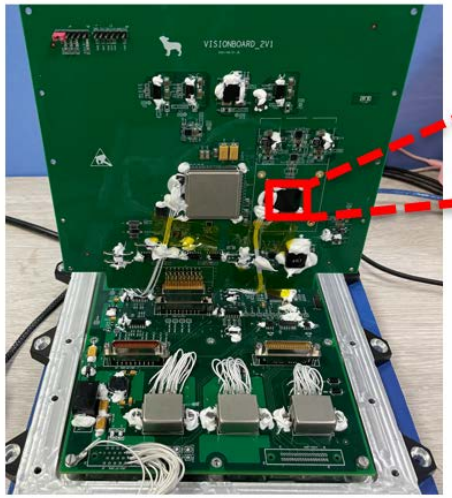
高速智能工业相机及模组

应用案例二：航天遥感图像智能检测载荷

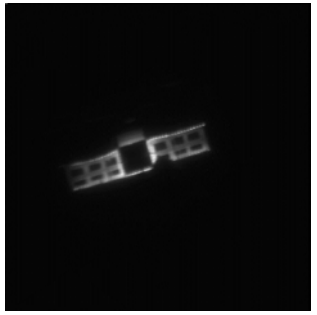
- 航天遥感卫星目标检测载荷，面向商业目标的星载智能图像处理。
- 与中科院小卫星中心合作，已搭载空间新技术试验卫星在轨开机运行。



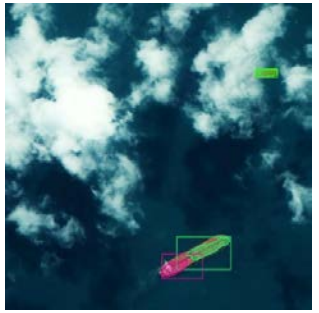
智能化检测载荷

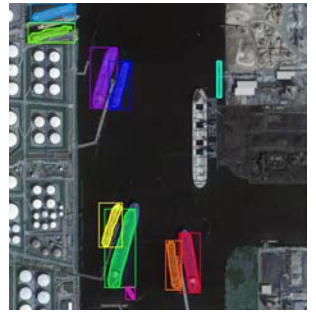


工艺	65 nm 1P9M
面积	4 mm × 6mm
芯片规模	~ 1500万门 (NAND2)
功耗	1 W @ 200 MHz
峰值计算能力	614GOPS @ 200MHz
频率	200MHz (Max)



遥感目标检测、目标跟踪

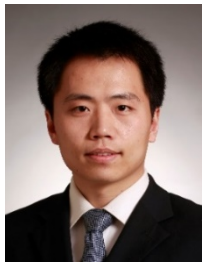


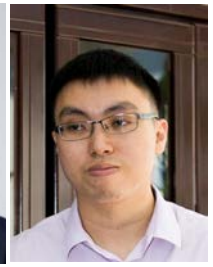


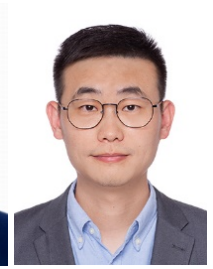
目标精确跟踪

团队介绍

高速图像传感与信息处理课题组

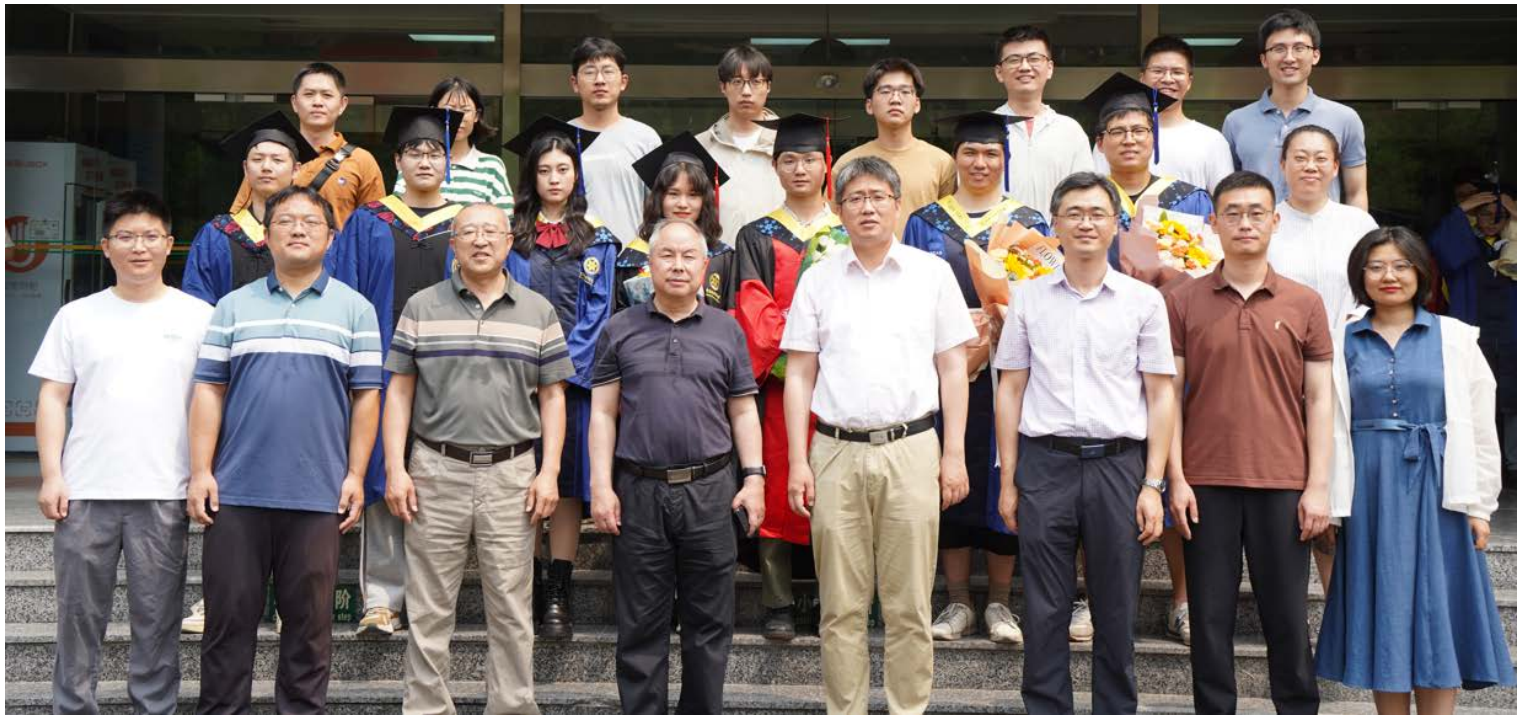






刘力源	吴南健	刘剑	祁楠	张钊	冯鹏	尹韬	于双铭	窦润江	杨旭	王哲	李贵柯
研究员	研究员	研究员	研究员	研究员	研究员	副研究员	副研究员	高级工程师	副研究员	助理研究员	助理研究员
课题组长	系统设计	光电器件	高速接口	高速接口	模拟电路	模拟电路	智能芯片	智能系统	智能传感	智能器件	智能系统

- **在职研究人员：12人**
- **学术头衔及学术任职：**
  - 中国科学院“百人计划”x3
  - 政府特殊津贴专家 x1
  - 国家高层次领军人才 x1
  - 国家重点研发计划项目首席 x2
  - 国家自然科学基金优青/青拔 x2
  - 中国科学院青促会会员 x2
  - 《半导体学报》副总编
  - 北京市科协托举计划 x1



谢 谢!

欢迎联系：liuly@semi.ac.cn