



华中师范大学
HUAZHONG NORMAL UNIVERSITY



Topmetal及读出电子学

李自立

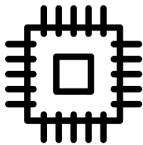
华中师范大学
硅像素实验室(PLAC)
夸克与轻子物理教育部重点实验室

2020/1/5

2020CXPB合作组会议



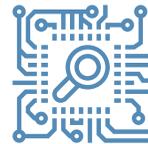
CONTENTS



01

Topmetal-II-

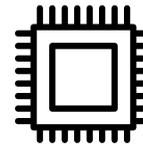
.....



02

Topmetal-II-电子学

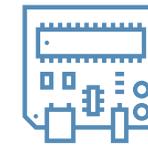
.....



03

Topmetal-M

.....



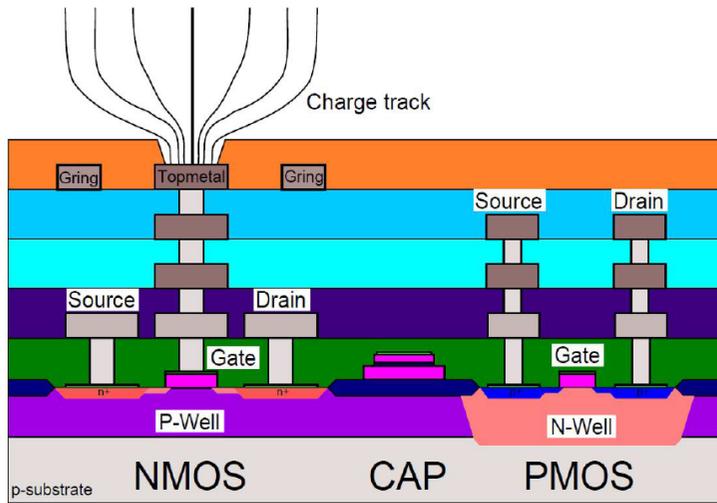
04

Topmetal-M芯片测试

.....

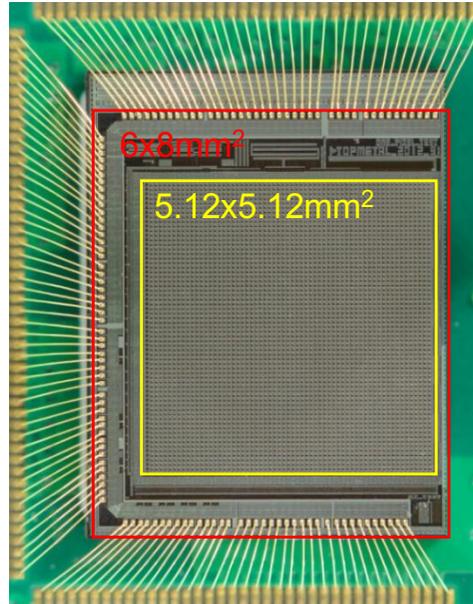
Topmetal-II-芯片

CMOS硅像素传感器



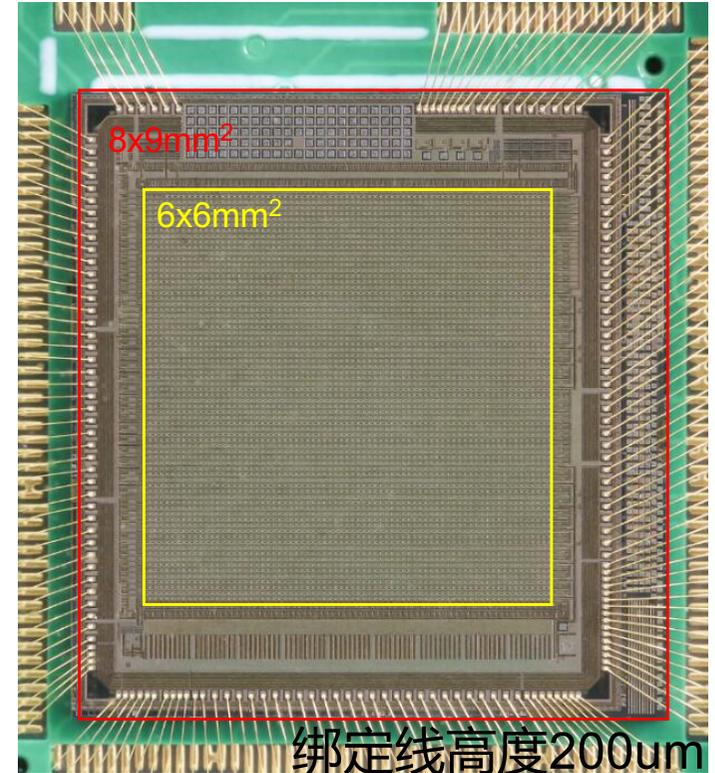
单个像素的顶层金属开窗，
直接收集电荷

Topmetal-I(2012)



- 阵列64x64
- 0.35 μm CMOS 工艺
- 像素间距80 μm
- 感应面积5.12x5.12mm²
- ENC = 330e⁻

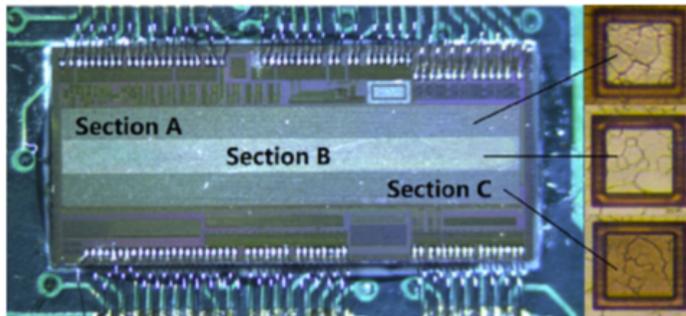
Topmetal-II-(2014)



- 阵列72x72
- 0.35 μm CMOS 工艺
- 像素间距83.2 μm
- 感应面积6x6mm²
- 反馈电容5.1fF
- ENC=13.9e⁻

Topmetal-II-芯片

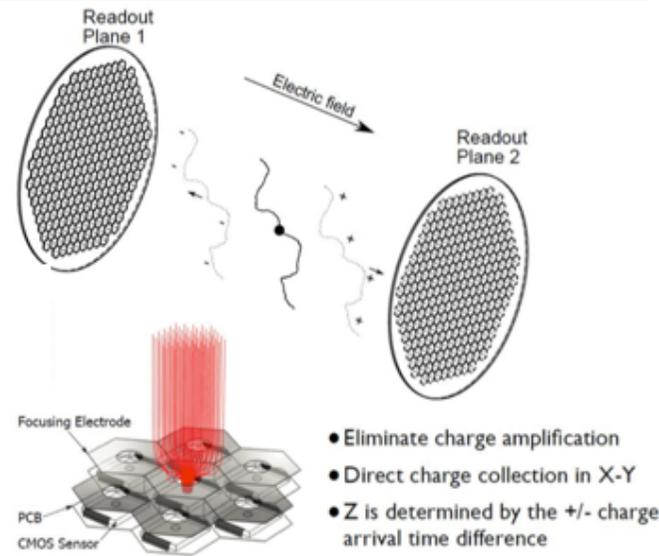
Topmetal-IIa



- 阵列45x216
- 反馈电容1.3fF
- 像素间距40 μ m
- 感应面积1.8x8.64mm²
- 芯片尺寸8*9*0.7mm³
- ENC=12.4e⁻

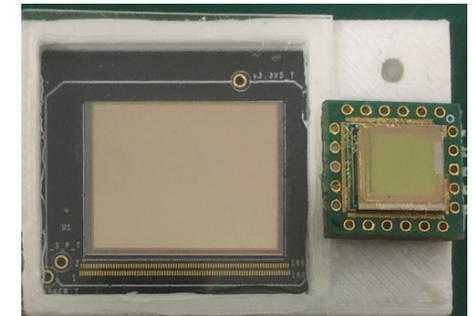
Topmetal-S

Topmetal CMOS charge sensor array for TPC



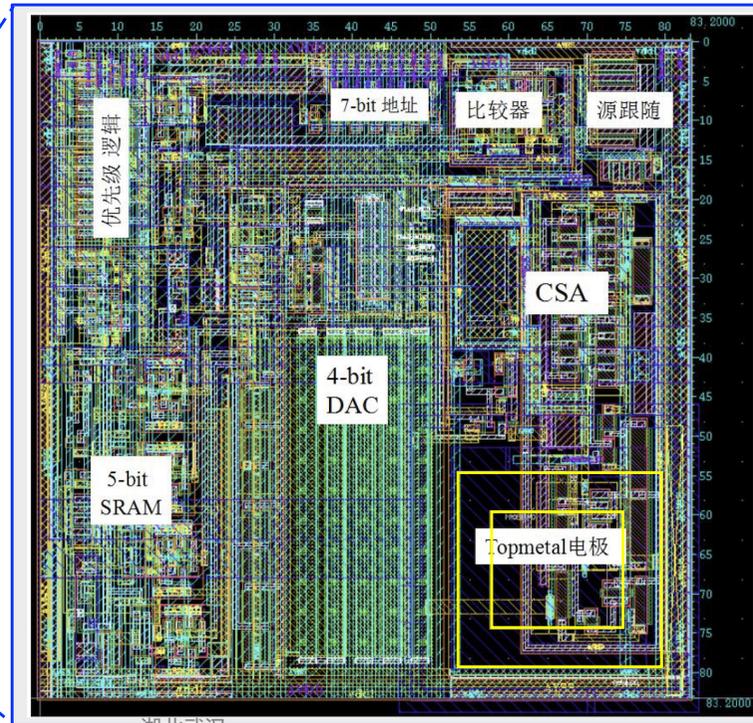
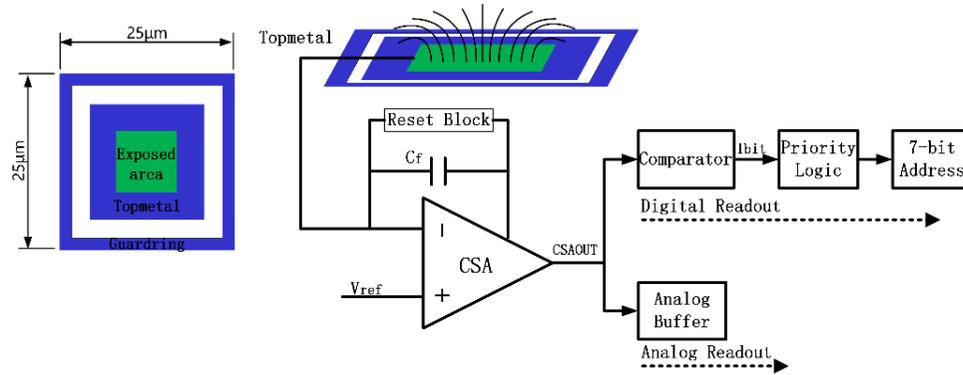
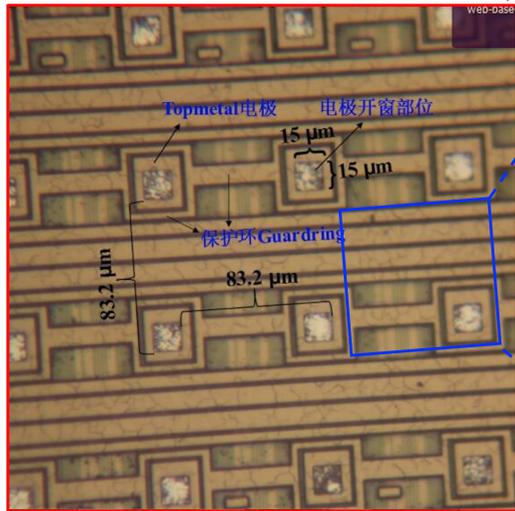
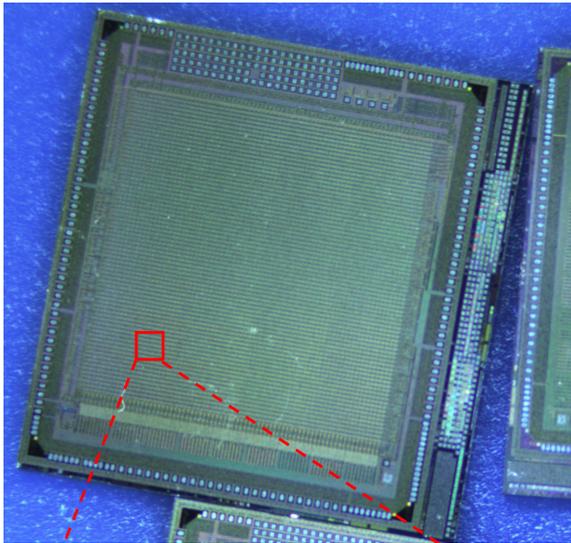
- 反馈电容3fF
- 电荷转换增益51 μ m/e⁻
- 正六边形电极尺寸1mm
- ENC=28.7e⁻

Topmetal-M



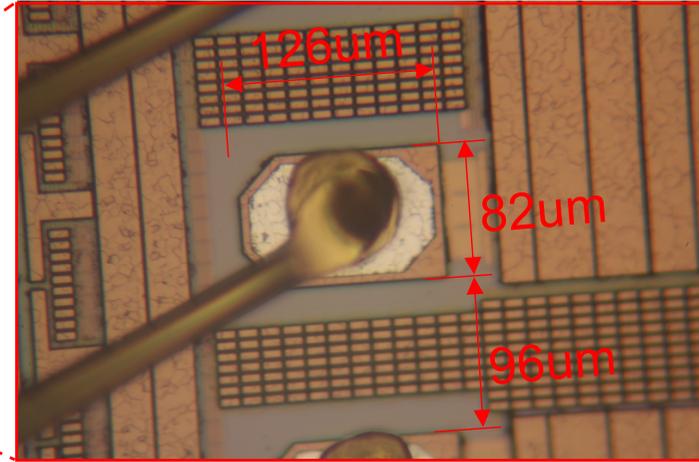
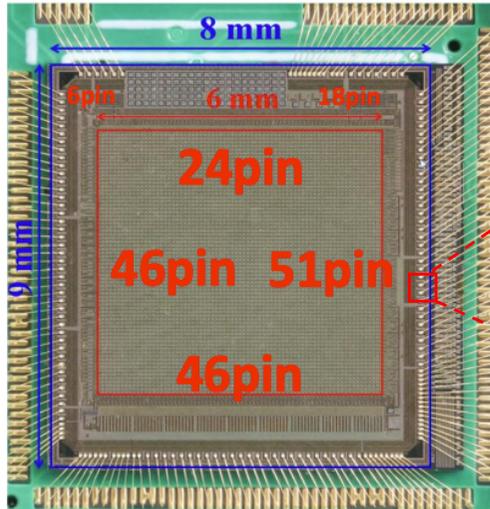
- 阵列400x512
- 像素间距40 μ m
- 感应面积16x20.48mm²
- 芯片尺寸18*23mm²
- ENC=15.4e⁻

Topmetal-II-芯片

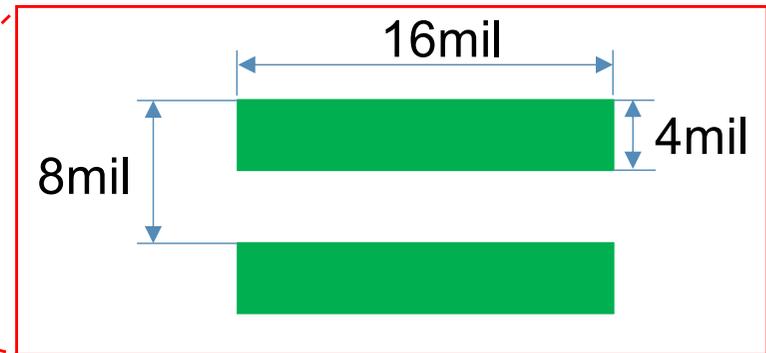
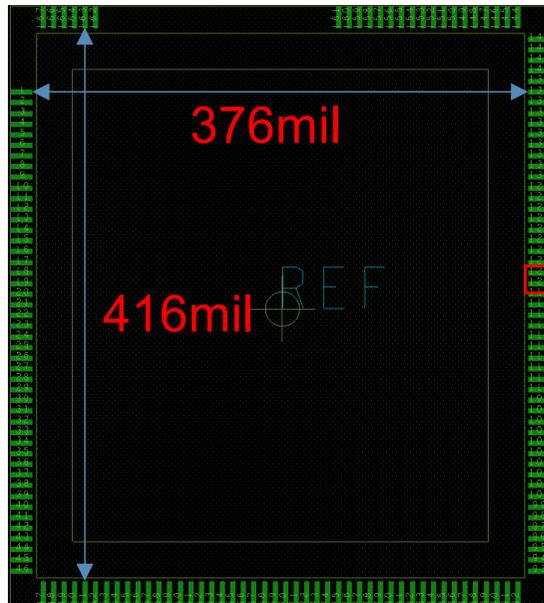


Topmetal-II-芯片

芯片封装



PCB封装

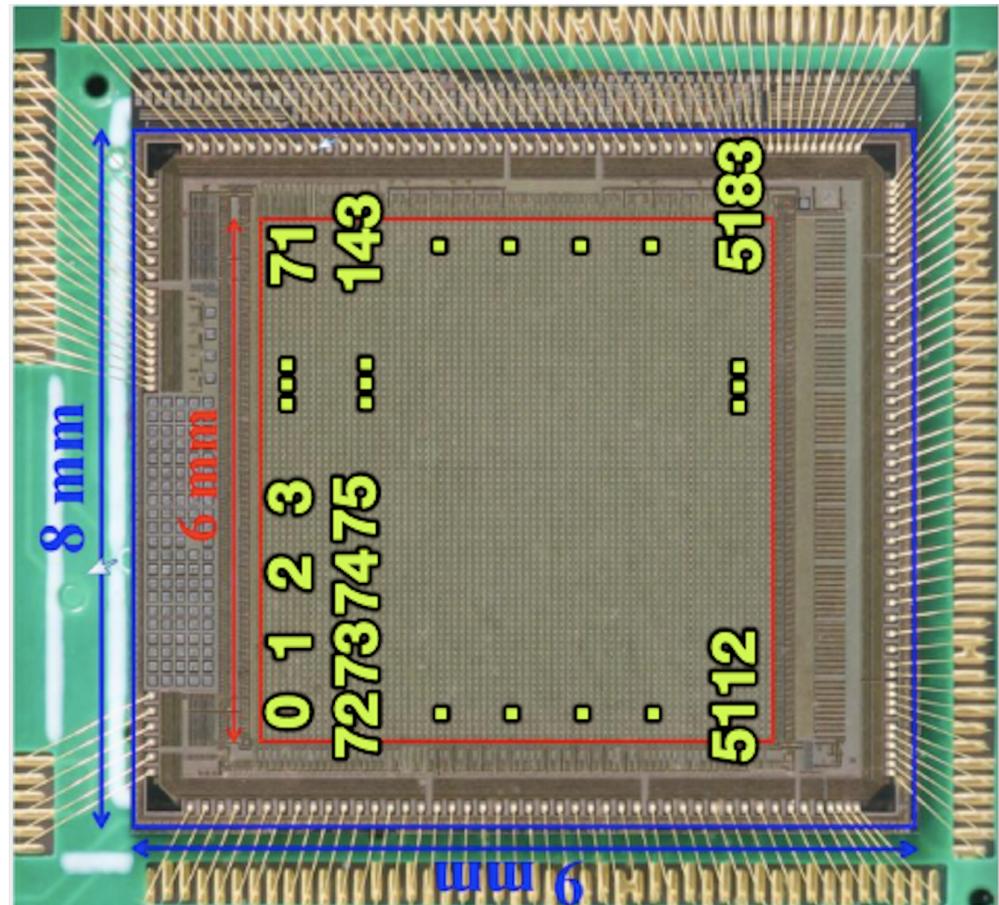


Topmetal-II-芯片

- 扫描模式rolling shutter
- Array Scan设计工作频率80MHz
- Array Scan最高频率100MHz
- DAQ允许Array Scan频率30MHz

- Array Scan=1.5625MHz
- 单像素停留640ns
- 帧率3.31776ms/frame

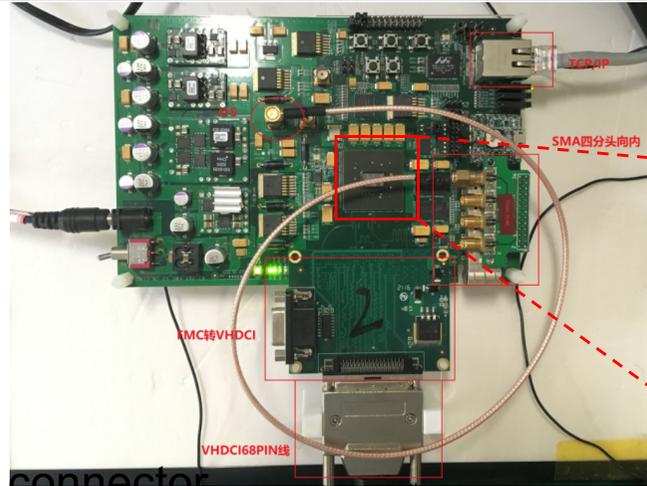
- 模拟读出实测功率：
 $3.3V \times 32.6mA = 107.58mW$
- 数字读出仿真功率：
 $3.3V \times 13mA = 42.9mW$



Topmetal-II-电子学

HPDAQ :

- Size: FPGA 18cm*12cm*3cm
- 10/100/1000 Ethernet PHY
- 256Mbyte DDR2 SODIMM
- Kintex-7, XC7K70TFBG676:
 - ① Slices: 10,250
 - ② Logic Cells: 65,600
 - ③ CLB Flip-Flops: 82,000
- FPGA Mezzanine Card (FMC) HPC connector

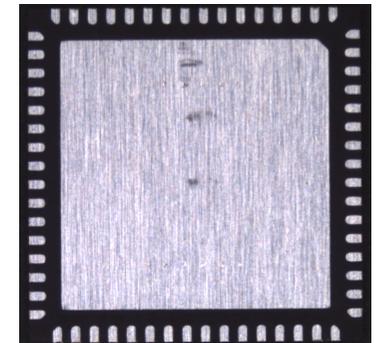
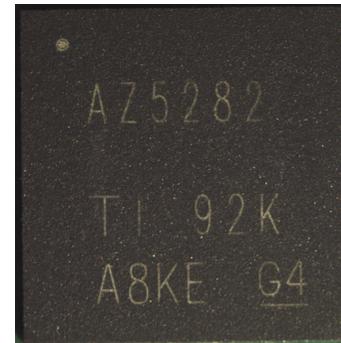


Kintex-7



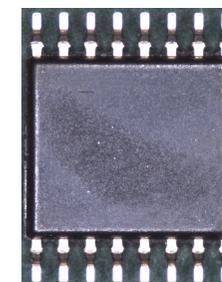
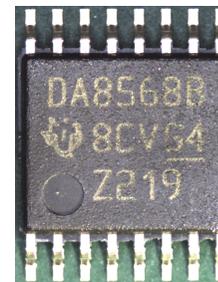
Analog-to-digital converters ADS5282:

- Speed and Resolution Grades: 12-bit, 65MSPS
- Power Dissipation: 77mW/Channel at 65MSPS
- 3.3V Analog Supply, 1.8V Digital Supply
- Package 9mm × 9mm QFN 64



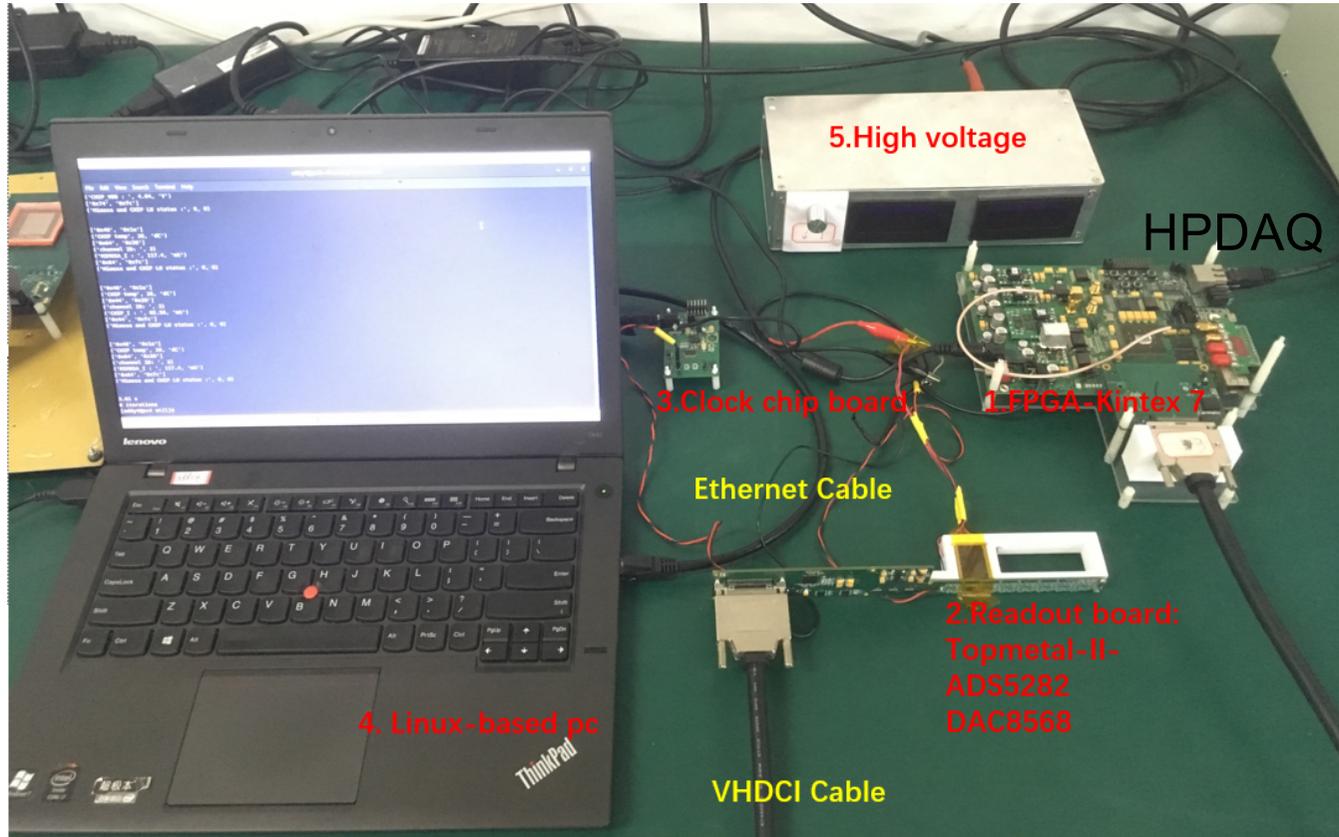
Digital-to-Analog Converters DAC8568:

- DAC8568 (16-Bit): 4 LSB INL
- 2.5V Reference Voltage (disabled by default)
- Ultralow Power Operation: 1.25mA at 5V
- Wide Power-Supply Range: +2.7V to +5.5V
- Package 5mm × 4.4mm TSSOP(16)



Topmetal-II-电子学

装置连接图



Topmetal-II-电子学

(1) 数据大小

扫描时间：Topmetal-II-在目前取数设置下，外部时钟为25MHz，模拟读出通道采样频率为1.5625MHz，则每个像素所用时间为640ns，芯片扫描72*72个像素形成一帧所用时间为 $640\text{ns} \times 72 \times 72 = 3.31776\text{ms}$ ，完成一次808帧取数时间约为2.68s。

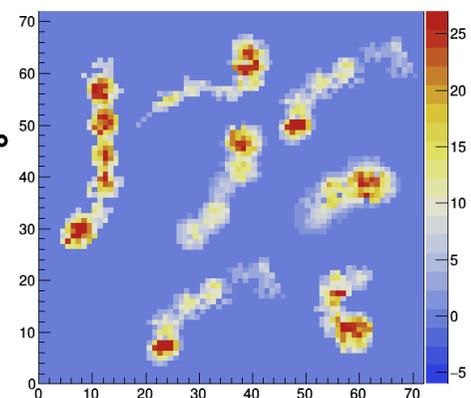
数据量：数据格式为pd1，1个芯片1次采样1帧数据大小为 $5184 \times 1 \times 2\text{byte} + 1024\text{byte} = 11.125\text{KB}$ ，连续取数速率约为3.29MB/S，需进行事例判断再储存以减少数据量。

(2) 通讯

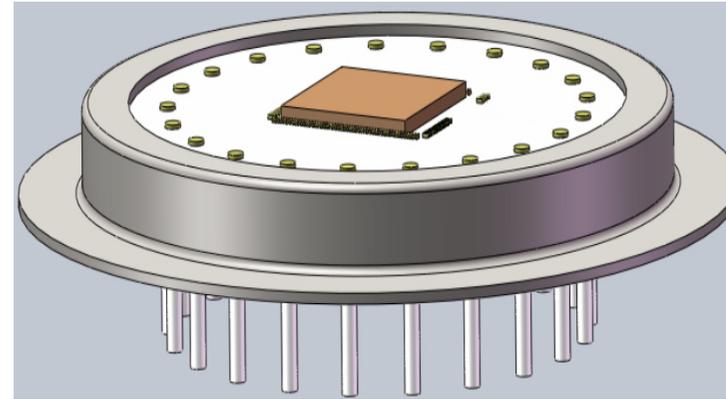
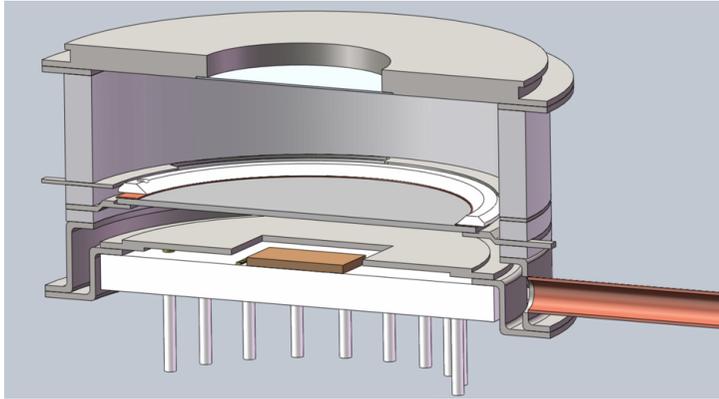
使用TCP/IP协议先储存到存储介质中，再对地面进行传输处理。

(3) 数据压缩

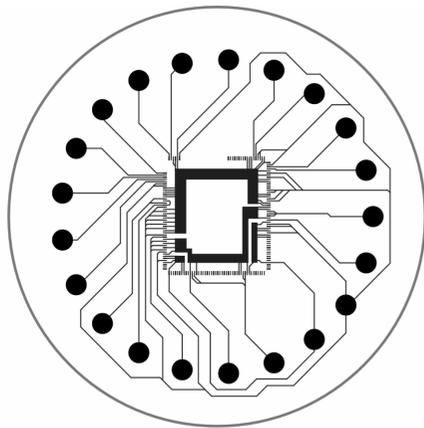
只提取击中像素区域数据，一帧数据预计可压缩至5%



Topmetal-II-电子学



陶瓷封装



Topmetal-M



Topmetal M是基于国产华虹宏力130nm双阱先进CMOS工艺，由PLAC实验室自主研发的一款大面积阵列**Topmetal+MAPS**像素探测器芯片，具备高性能的**位置、时间、能量**分辨率。

技术指标：

大尺寸：18 mm X 23 mm

基于国产工艺开发（突破国外技术封锁）

双阱工艺：全耗尽型，提高电荷收集效率

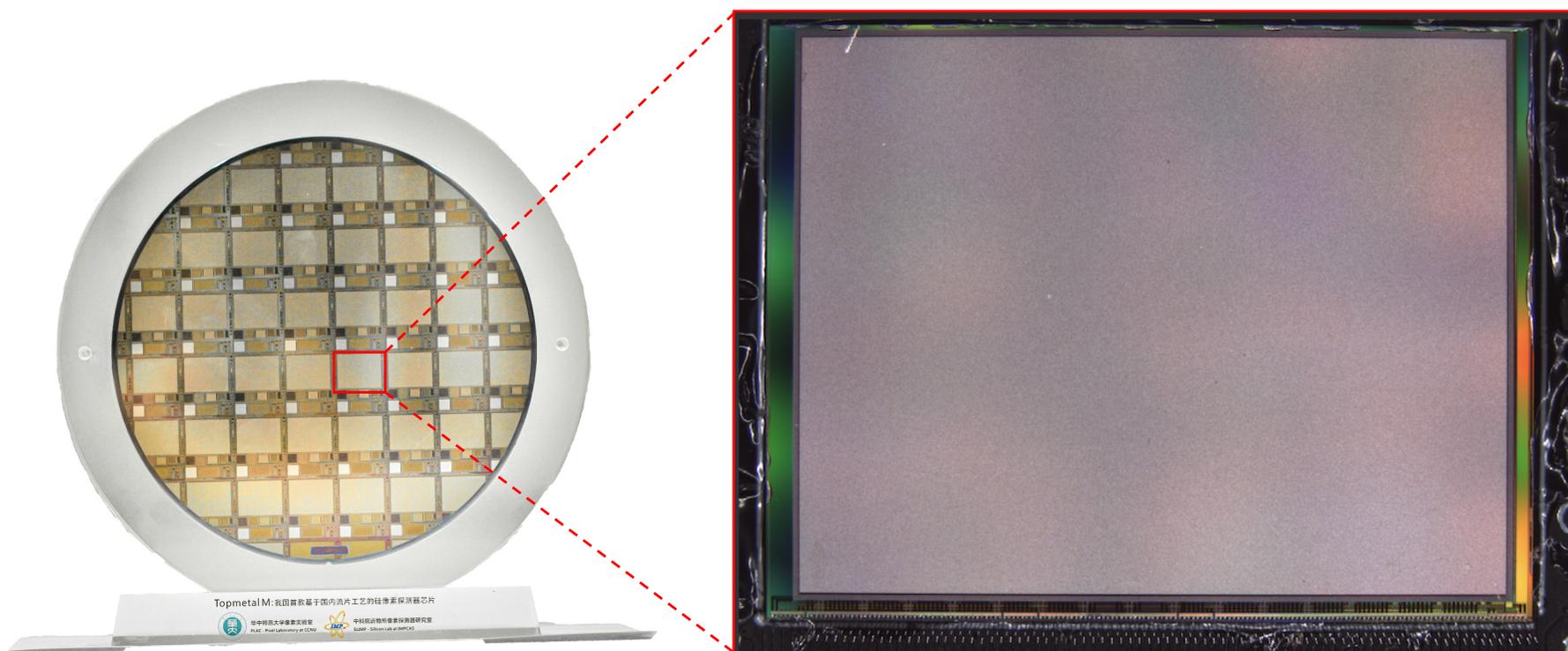
像素阵列：400 X 512

像素尺寸：40 μm x 40 μm

Sensor（电荷收集方式）：Topmetal + MAPS 结合（首次提出，独创）

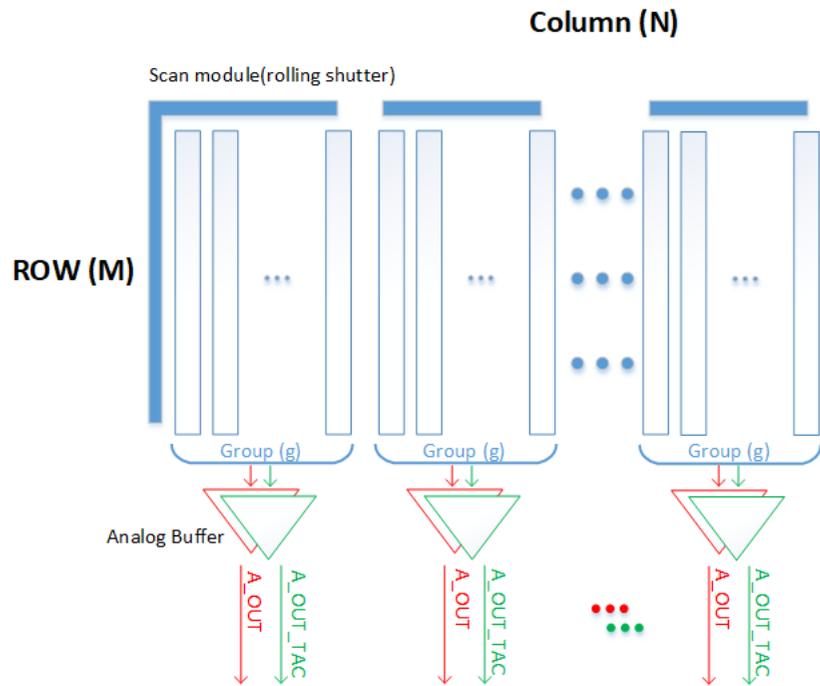
有效探测面积：16 mm X 20.48 mm

Topmetal-M



Topmetal-M

整体架构



16组通道并行输出

Sensor (Topmetal + MAPS)

1 Topmetal M 芯片sensor部分，首次提出采用 topmetal + MAPS相结合的方式，根据需求选用其中一种电荷收集方式，提升芯片的可适用范围

Pixel (能量信息、时间信息)

2 CSA——收集电荷，进行放大 (超低噪声)
Comprator + TAC——记录粒子到达时间

Readout (analog readout)

3 采用经典的Rolling Shutter读出方式将单个像素 CSA及TAC采集的信号A_OUT/A_OUT_TAC依次读出至芯片外部。

32列为一组，共16组通道并行输出。

Rolling Shutter : 20 MHz

Frame rate : 1.5625 KHz

Topmetal-M

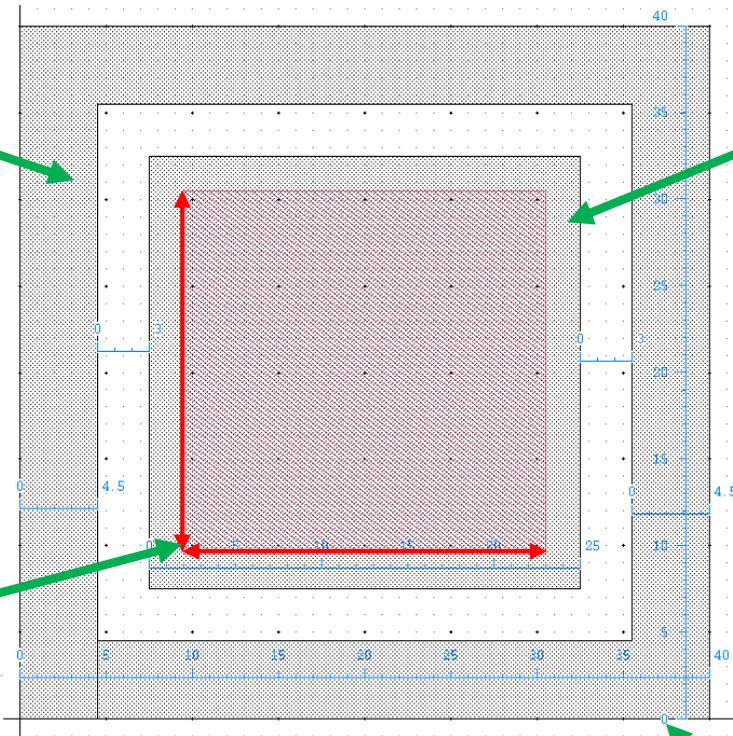
Sensor——电荷收集电极 Topmetal 及其保护环 Guardring

保护环 Guardring

- Guarding 距离 topmetal为 $3\ \mu\text{m}$ (工艺允许的最小间距), 环绕 Topmetal一圈, 采用顶层金属 MTT层, Guarding彼此串接

电极开窗

- 位于Topmetal 电极中心区域的 $21\ \mu\text{m} \times 21\ \mu\text{m}$ 部分利用PA层开窗后形成裸露电极, 该裸露部分是直接收集和感应电荷的区域



Topmetal 收集电极

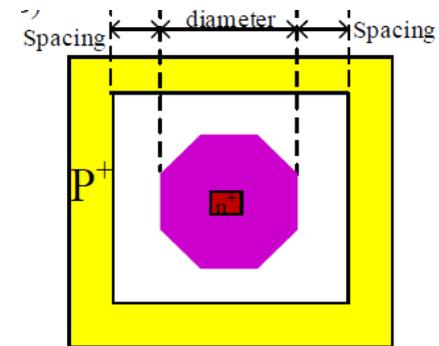
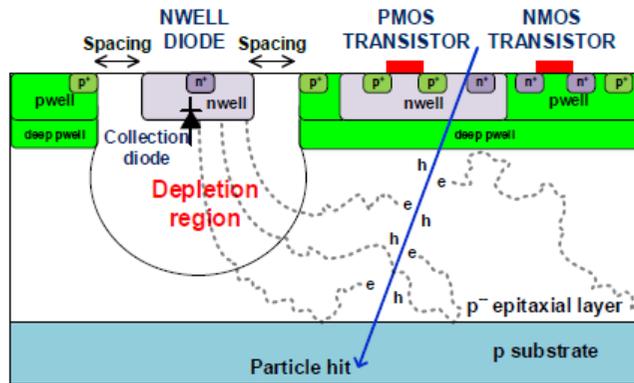
- Topmetal的总面积为 $25\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m}$, 为顶层金属MTT层

单像素

- 单像素占用面积为 $40\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$
- Guardring 与 Topmetal 电极彼此分离, 当加上不同的直流电位时, 二者之间电势差使在电极周围形成聚焦电场, 提高电荷收集效率。

Topmetal-M

Sensor—— diode (MAPS)

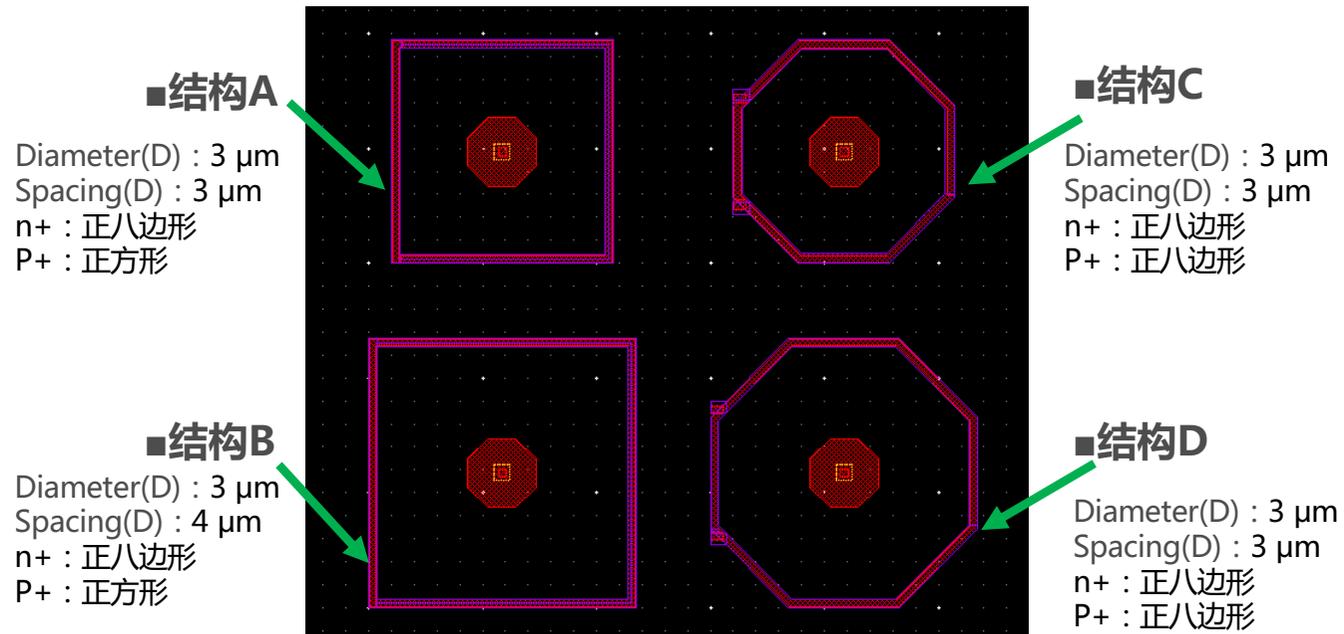


MAPS把探测器部分和读出电子学集成在同一个芯片上，利用PN结形成的diode收集电荷

Topmetal M 采用正八边形diode结构，PMOS复位方式

Topmetal-M

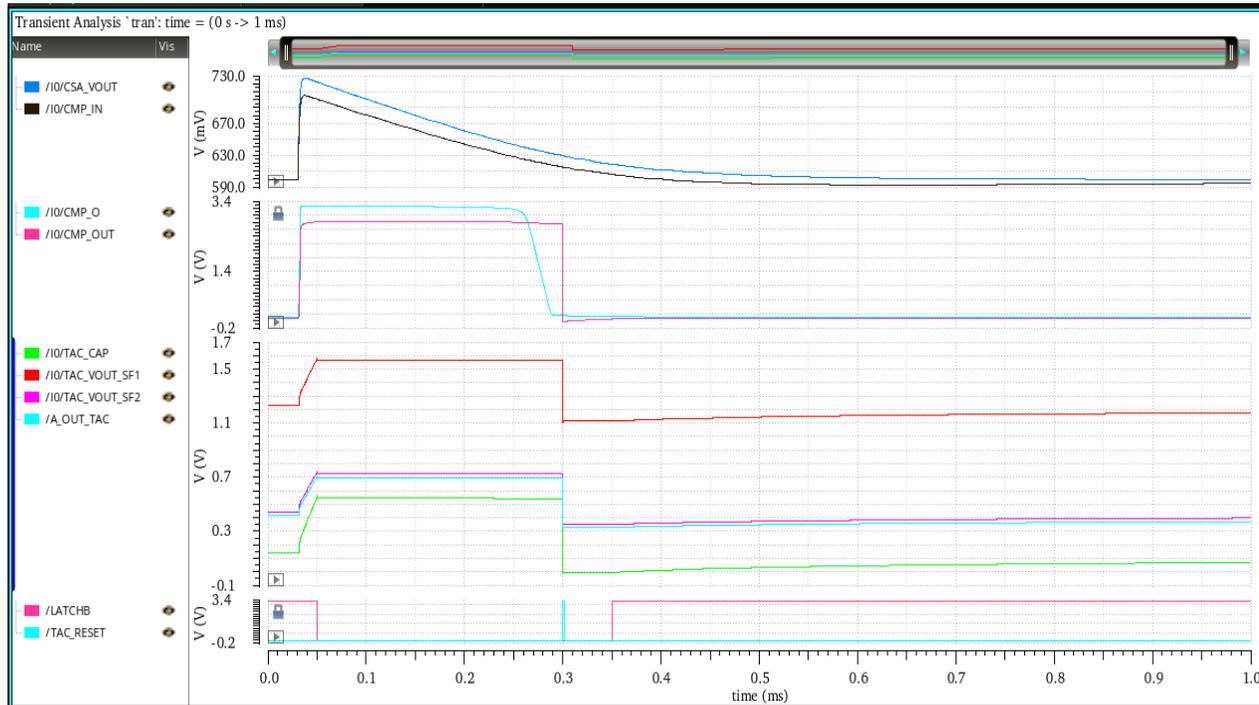
Sensor——diode (MAPS)



根据diode收集电荷的原理，在Topmetal M芯片中，我们设计了A、B、C、D四种结构的diode，研究形状、距离等因素对其电荷收集能力的影响。

Topmetal-M

Pixel信号波形图



- 像素面积: $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$
- ENC : $15.4 e^-$
- 功耗 : $2.23 \mu\text{A}$
- PeakingTime : $10 \mu\text{s}$
- DecayTime : $300 \mu\text{s}$ (可调)
- 电荷转换增益 : $90 \mu\text{V}/e^-$
- Input range : $13.5\text{K } e^-$

pixel电路工作原理

当粒子入射时，CSA将sensor采集到的信号放大，当CSA输出信号超过比较器阈值时，比较器输出信号翻转，TAC开始充电。LATCHB 和TAC_RESET信号可控制TAC充电时间以及复位时刻（通过外部输入信号调控）

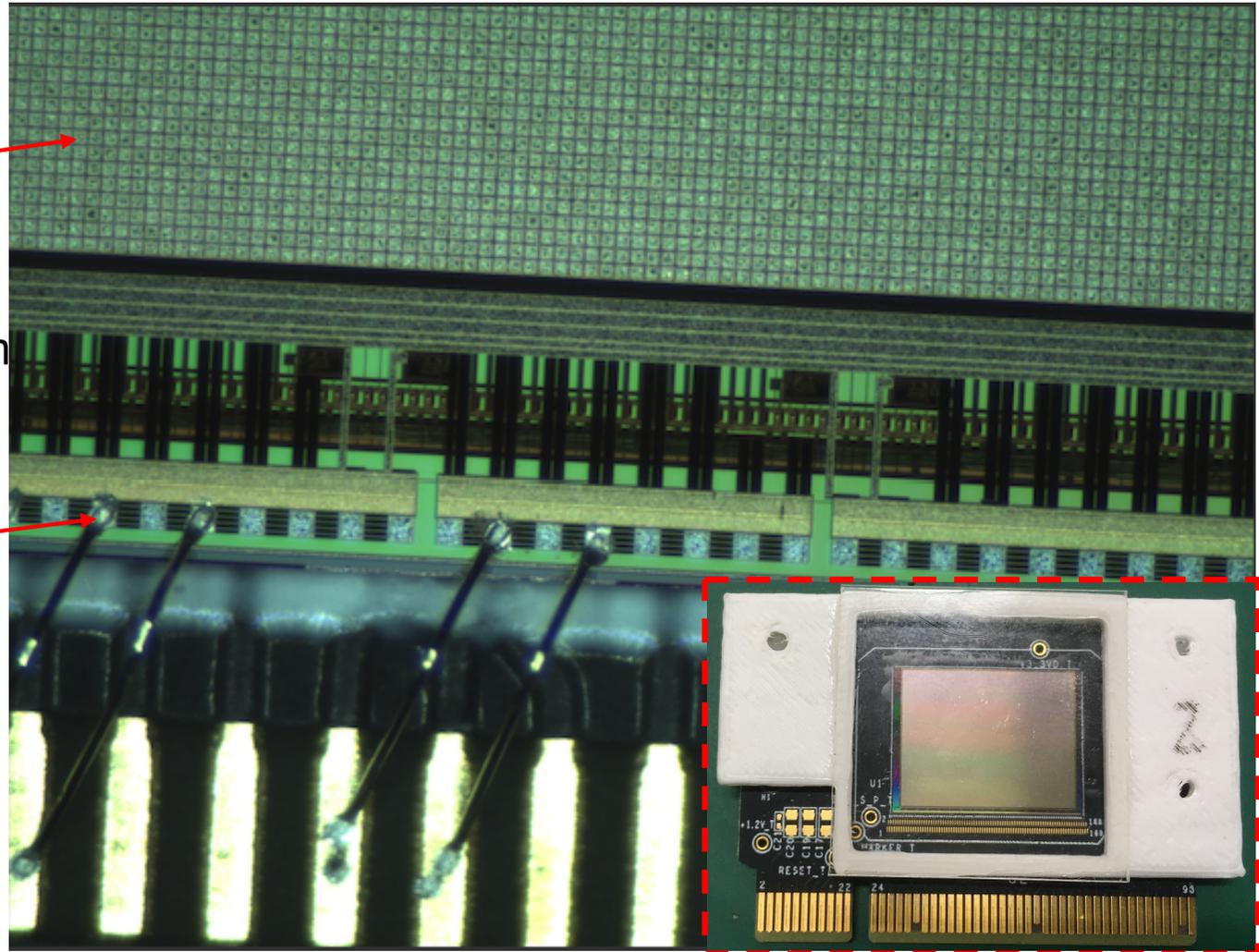
Topmetal-M

像素阵列区

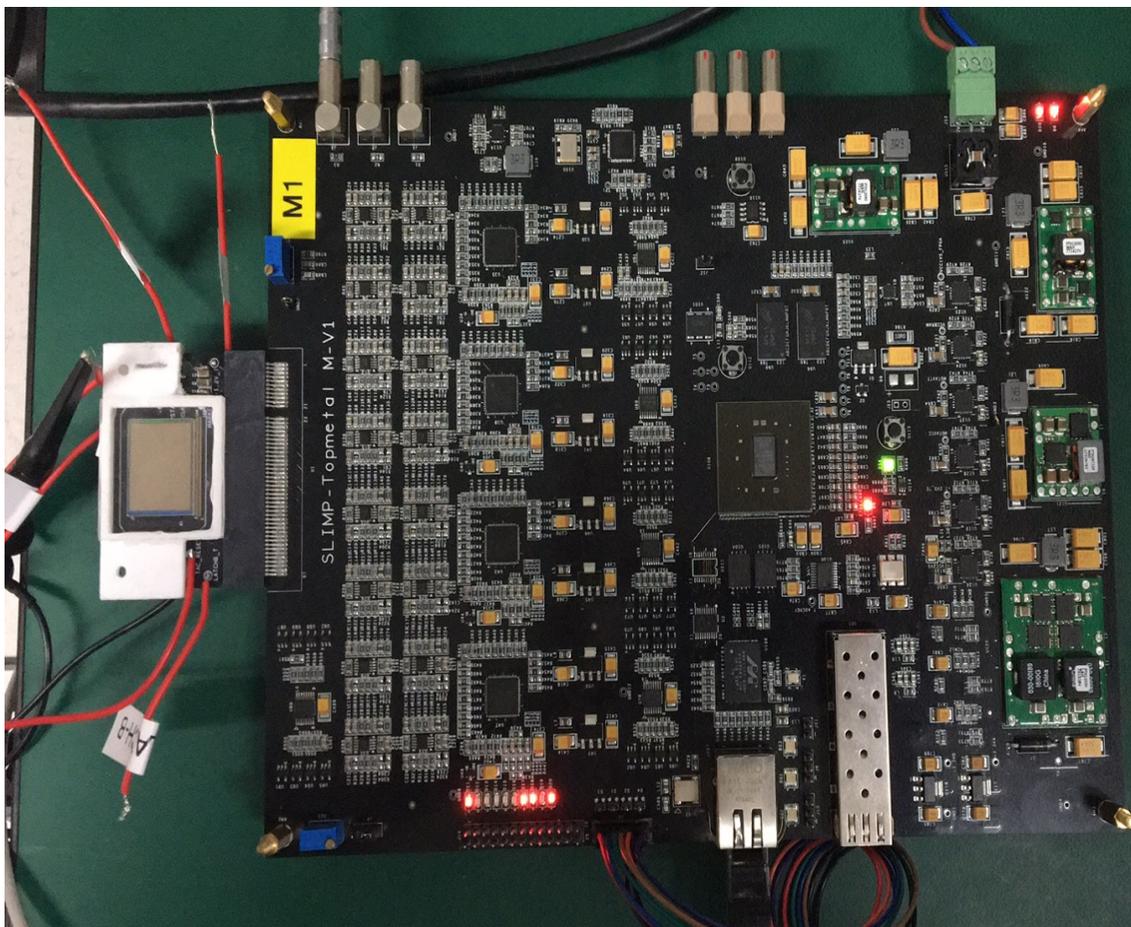
- 400 X 512 matrix
- 40 μm x 40 μm
- 16 mm X 20.48 mm

Bonding PAD区

- Pad数169
- 大小70 μm X 70 μm
- 间隔60 μm



Topmetal-M芯片测试



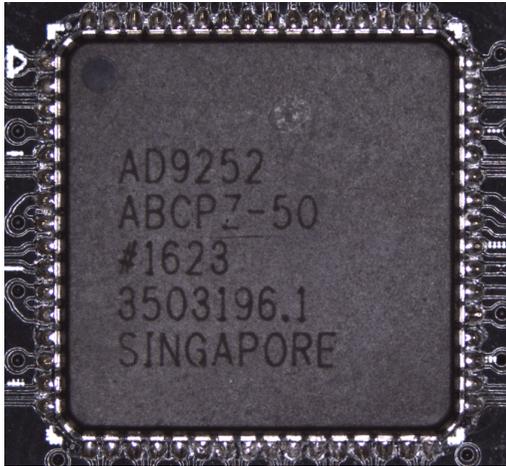
测试内容:

- 整个像素阵列的全扫描
- 单点像素功能以及性能测试（停在某一点的性能测试）
- clk, speak（扫描点数），Latchb（电容充电）控制信号，以及阵列开始的标记输出Marker信号是否正确
- 阵列是否感光好，输出模拟量是否跟随扫描speak信号变化

测试板FPGA: XC7K70TFBG676

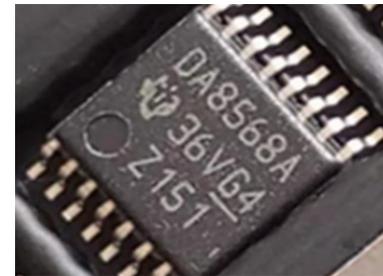
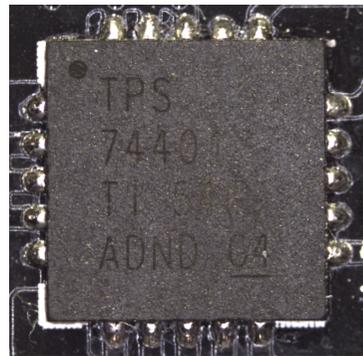
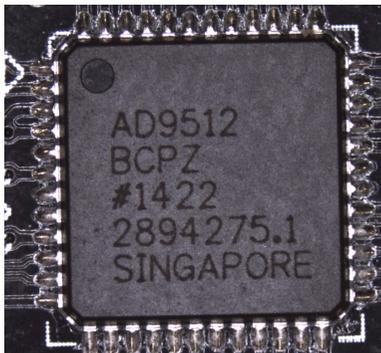
- 千兆以太网控制芯片
- 32路模拟输出信号，分为16路时间和能量输出

Topmetal-M芯片测试



Analog-to-digital converters ADS9252:

- Speed and Resolution Grades: 14-bit, 50MSPS
- Power Dissipation: 93.5mW/Channel at 50MSPS
- 1.8V Power Supply
- 串行LVDS、8通道、1.8 V ADC
- 325 MHz, full-power analog bandwidth
- Package 9mm × 9mm QFN 64



Topmetal-M芯片测试-测试结果图



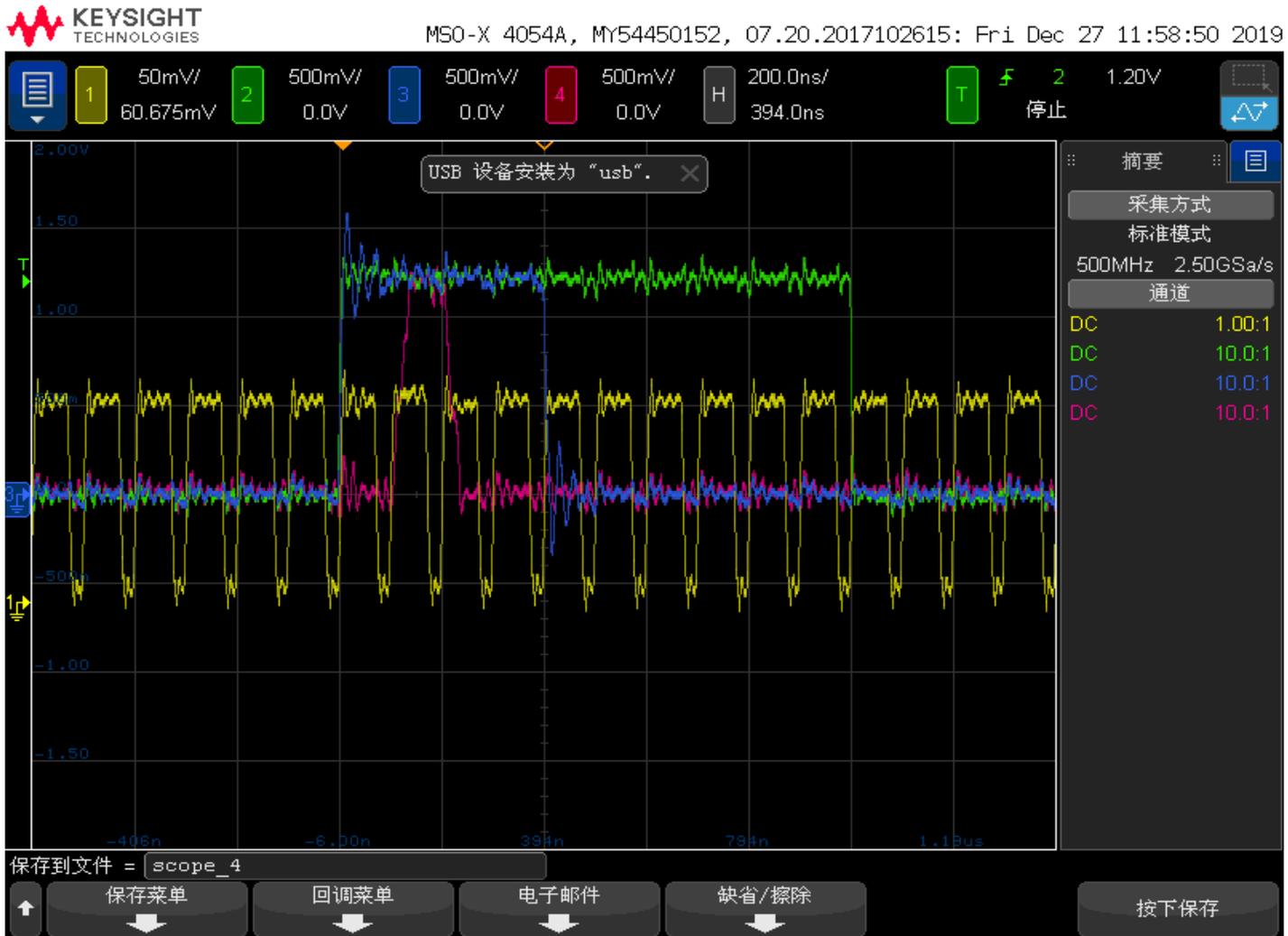
黄色 : 时钟信号
(10M)

蓝色 : speak (扫描点
数) 1us 10个像素

粉色 : Marker (标记扫
描第一个像素点)

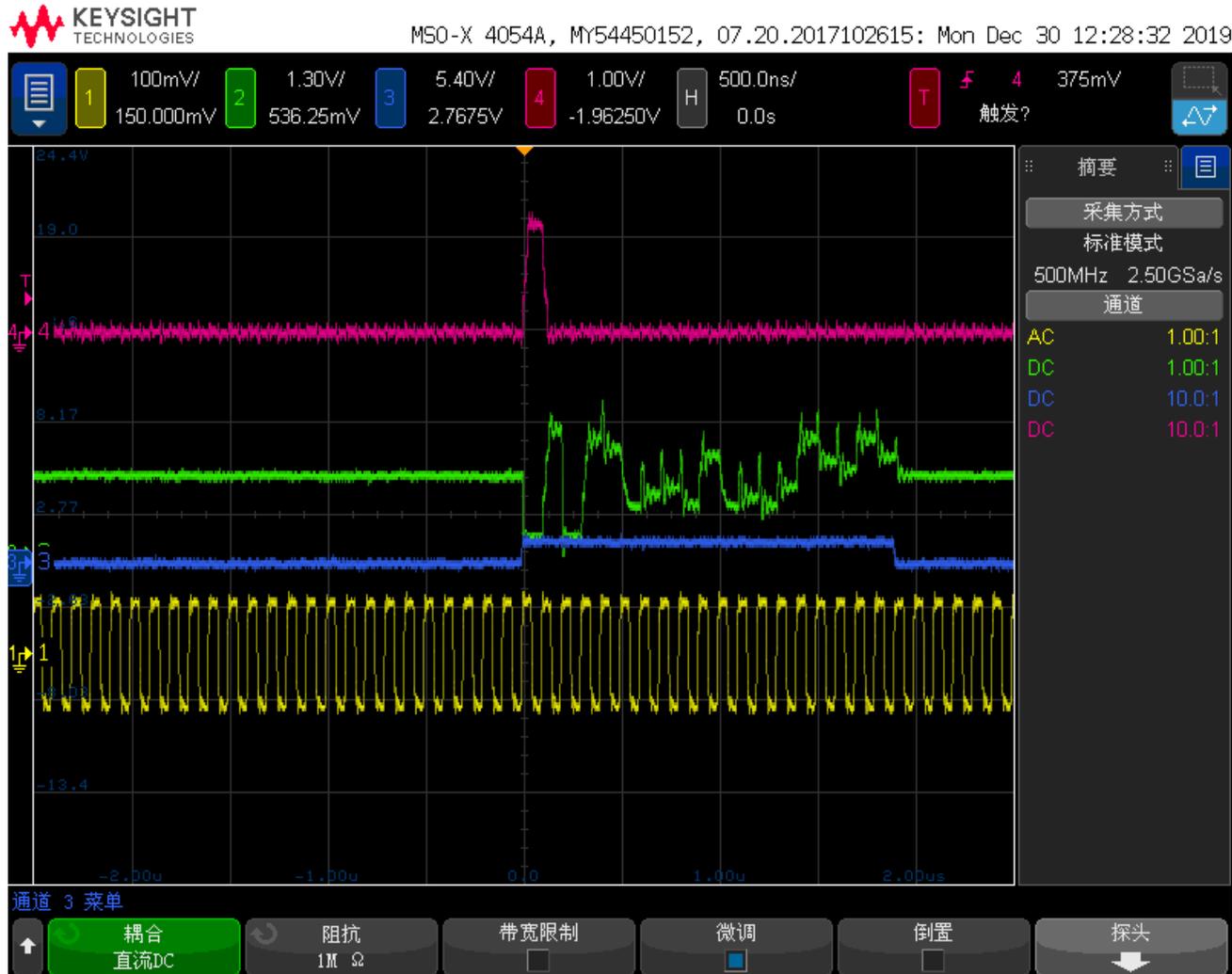
绿色 : LATCHB (充
电) 2US

Topmetal-M芯片测试-在像素点和充电时间可调下的结果



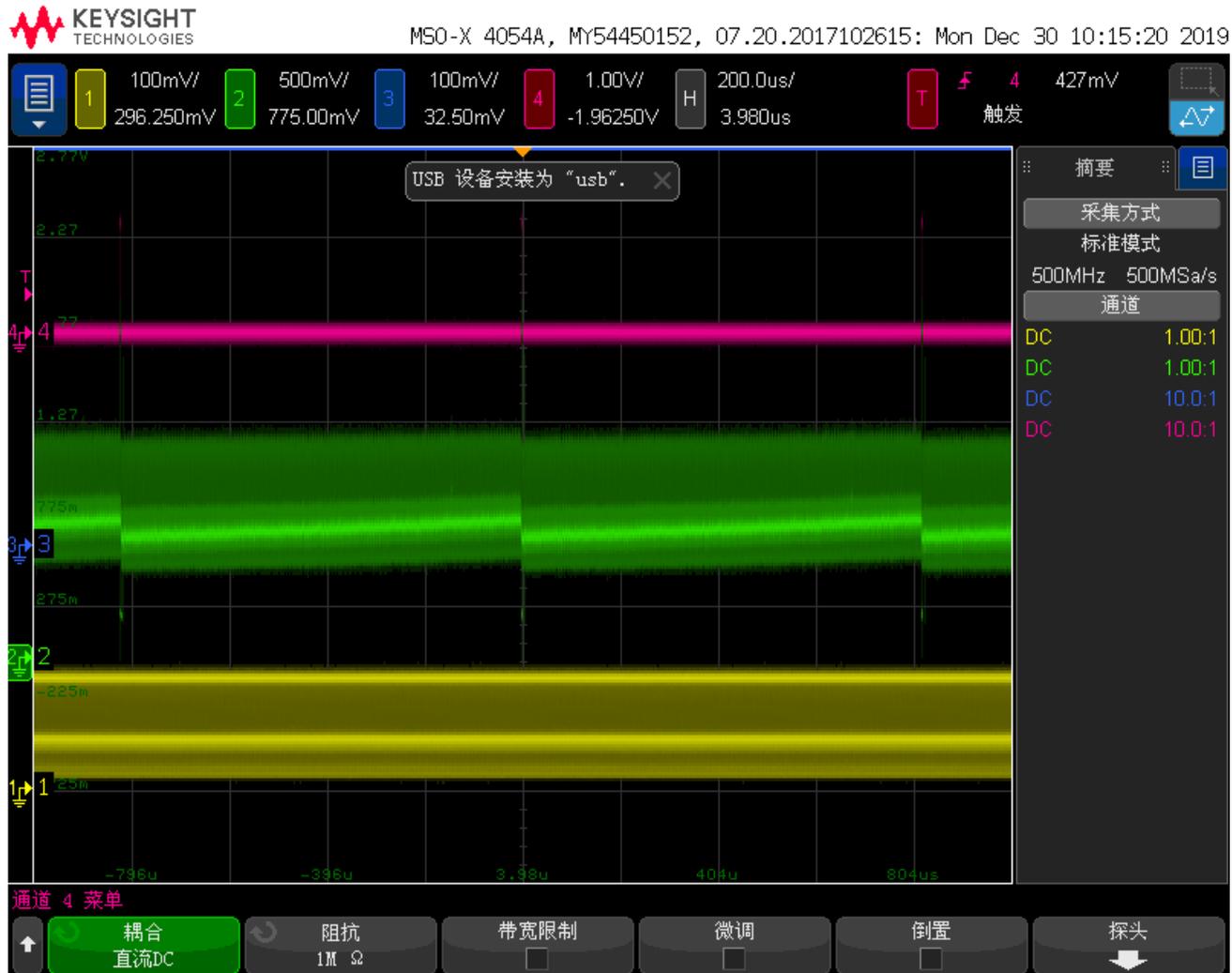
- 黄色 : 时钟信号 (10M)
- 蓝色 : speak (扫描) 400n 4
- 粉色 : Marker (标记扫描第一个像素点)
- 绿色 : LATCHB (充电) 1US

Topmetal-M芯片测试-扫描20个像素点



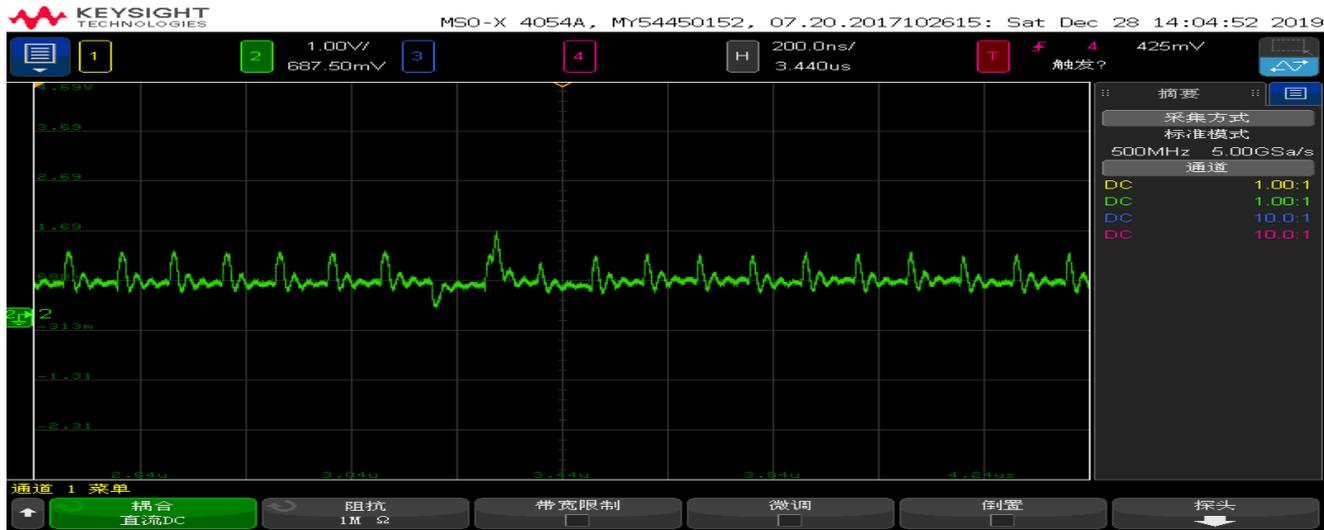
- 黄色：时钟信号（10M）
- 蓝色：speak（扫描20个点）
- 粉色：Marker（标记扫描第一个像素点）
- 绿色：模拟输出20个相应（每组前三个像素分别设为0,1,0，如图所示，符合正确输出）

Topmetal-M电子学-连续扫描

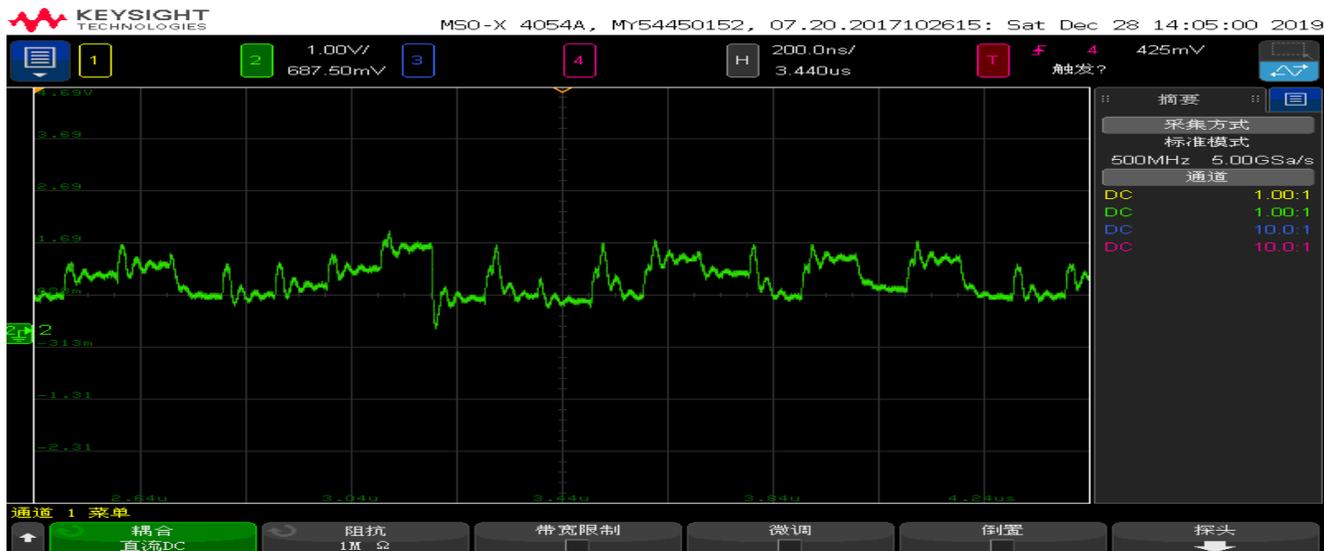


黄色：时钟信号（10M）
粉色：Marker (标记扫描第一个像素点)
绿色：模拟输出（每204800个像素循环输出）

Topmetal-M电子学-遮光



绿色：模拟输出
(每204800个像素
循环输出)



Topmetal-M电子学

	INFN 3th generation	Timepix3	Topmetal-II-	Topmetal-M
Active area	15*15mm ²	16.12*14.11mm ²	6*6mm ²	16*20.48mm ²
chip size	-	14.08*14.08mm ²	8*9mm ²	18*23mm ²
Pixel matrix	300*352	256*256	72*72	400*512
Pixel pitch	50 μm	55μm*55μm	83.2μm	40μm
Pixel size	-	octagonal shape,side len	15μm(25μm max)	25μm*25μm
Time resolution	-	-	3.31776ms	640us
Peaking time (externally adj)	3-10 ms	-	<10ms	10us
Decay time (100%~10%)			100ms	300us(adjustable)
Full scale linear range	30k e-	10k e-	60k e-	13.5k e-
Pixel noise	50 electrons ENC	62 electrons ENC	13.9 electrons ENC	15.4 electrons ENC
Read-out mode	Asynchronous and synchronous	-	-	-
Trigger mode	Internal, external, self-trigger	-	External	External
Read-out clock	Up to 10 MHz	Up to 100 MHz	Up to 80 MHz	20MHz(Up to 40 MHz)
Self-trigger global threshold	2000 electrons	-	-	-
Frame rate	Up to 10 kHz(event window self	-	0.3 kHz	1.5625KHz
Parallel analog output buffer	1, 8 or 16	-	1	-
Access to pixel counter	Direct (single pixel) or serial, (8-	-	full matrix	16 clusters
		-	-	-
Total power dissipation	0.5 W (self-trigger mode)	-	105mW	2.23uA/pixel
Fill fraction (metal/active area)	92%	-	45%	-
package pins	304	-	167	169
Max readout clock frequency	200MHz	-	30MHz	-
Technology(μm)	-	0.13	0.35	0.13
thickness of sensor	-	-	700μm	100μm
A_OUT range(V)				0.9~2.1
A_OUT_TAC range (V)				0.9~2.1



谢谢聆听
Thank you very much

2020/1/5

