

# 背照式传感器提升了成像速度

新型传感器推动了高速成像的进步

当速度超过了每秒一百万帧，高速成像便成为了一种无价的研究工具，能够捕获科学和工程应用中转瞬即逝的现象。然而，达到这一速度需要满足附加条件。大多数高速摄像机的设计都旨在达到最大的吞吐量-以十亿像素/秒 (Gpx/sec) 为单位，但需要在帧速率和分辨率之间进行权衡。例如，一台 25 Gpx/sec 的摄像机在 1280 x 800 像素的分辨率下可达到每秒 25,700 帧 (fps) 的速度，并且在 1280 x 720 的较小分辨率下可以达到 28,500 的更高帧速率。这两种组合的吞吐量几乎相同。如果帧速率较高 (例如每秒一百万帧)，而分辨率非常低，就会使得看清楚研究对象更具有挑战。

随着帧速率的增加，用来照明像素的曝光时间就会减少。如果帧速率为每秒 25,700 帧，每帧的最长曝光时间为 39 微秒 ( $\mu\text{s}$ )，而如果帧速率为每秒一百万帧，则最长曝光时间仅为 733 纳秒 (ns)。短曝光时间需要高水平的照明，才能补偿像素接收光线的短时间。实际上，许多高帧速率都存在光线不足 — 这意味着，如果在高帧速率下曝光时间非常短，可用照明不能将足够的光传递到摄像机的成像传感器中，因此难以产生理想的图像，甚至在某些应用中可能显得不切实际。

高速摄像机操作员已经可以熟练在速度和分辨率的需求与对充足照明的需求之间取得平衡。他们能够捕获令人惊叹的图像，从而推动科学理解和工程分析的前沿发展，但是随着用户突破高速成像的边界，这种平衡变得更加难以掌控。

开发者：



PHANTOM<sup>®</sup>

VISION  
RESEARCH

AMETEK<sup>®</sup>  
MATERIALS ANALYSIS DIVISION

When it's too fast to see, and too important not to.®



我们最近取得了技术上的突破,拓宽了对速度、分辨率以及感光度的限制。我们开发了一种新型的高速成像传感器,该传感器采用背面照明 (BSI),从而可增加捕获光子的像素表面积。由于 BSI 式传感器在捕获光线方面更有效,因此更适合需要高帧速率的应用。与前几代高速 CMOS 成像传感器相比,该摄像机的吞吐量(最大帧速率乘以最大帧分辨率)提高了三倍。新传感器于 2021 年 3 月首次应用于新型 Phantom TMX 摄像机,最快可以达到以 1280 x 800 像素的全分辨率每秒拍摄 76,000 帧(请参见侧栏)。

在本篇技术文章中,我们将解释 BSI 的工作原理以及使用 BSI 传感器进行高速成像的挑战与优点。我们还将深入研究其他传感器体系结构的改进,以在此基础上使新传感器达到一流的速度和性能。



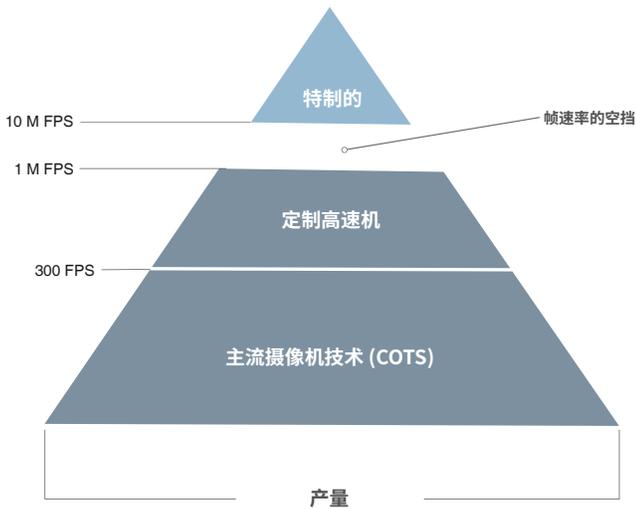
Phantom TMX 7510



## 将 BSI 应用于高速摄像机

到目前为止,高速摄像机中使用的 CMOS 传感器都基于正面照明 (FSI) 体系结构,其中像素光电二极管上方的传感器金属电路面向光源。这种金属电路可防止某些入射光到达像素点,从而影响填充系数并降低传感器的感光度。BSI 传感器在设计上采用较厚的载体晶圆,并将其安装在金属叠层的顶部。这种设计可以使体硅变薄并翻转,从而使二极管面对光源,而金属表面在其背后。BSI 传感器在高速下有两个显著的优势:通过提供直接路径,使光线到达光接收表面来改善填充系数(请参见图 1),以及通过在传感器的金属表面中添加更多金属来提高处理速度。

**改善填充系数:**捕获入射光的有效性即传感器的填充系数,或指能够捕获光子的像素表面积百分比)。由于金属电路会阻挡或反射某些光线,因此用于高速成像的传统 FSI 传感器的填充系数将介于 50% 至 60% 之间,并由当前使用的传统 FSI 传感器中的微透镜进行部分补偿。通过移开电路,我们新型 BSI 传感器的填充系数接近 100%。



应用于高速成像的背照式 (BSI) 技术有助于开始缩小定制高速成像和特制成像之间的帧速率差距。

## Phantom TMX 超高速摄像机简介

我们的新型 TMX 超高速摄像机是首款采用新型 BSI 传感器的摄像机。TMX 7510 是该系列中最快的摄像机,以当今最高的分辨率提供最快的帧速率:

- TMX 7510 的吞吐量为 75 Gpx/sec,在 1280 x 800 的全分辨率下可以达到每秒 76,000 帧的速度,在 1280 x 192 的分辨率下可以达到每秒 300,000 帧以上的速度。
- TMX 在 2 x 2 的像素组合模式下可实现高速成像,例如,在 640 x 384 像素组合模式下,速率可达到每秒 308,000 帧。
- 使用 FAST 选项(出口控制)时, TMX 在 1280 x 32 的分辨率下或 640 x 64 的像素融合模式下,可达到每秒 175 百万帧的速度。FAST 选项还包括 95 ns 的最短曝光时间。

除了具有变革性的传感器之外, TMX 的设计还考虑了数据管理,具有高达 512 GB 的内存和高达 8 TB 的 CineMag 安全存储空间。为了实现快速传输数据,10Gb 以太网是标配。

最后, TMX 还具有一系列控制选项。其中包括用于灵活控制信号的可编程 I/O,用于无计算机操作的机身控制按钮和视频监控,以及满足不同应用需求的各种信号端口。

要达到每秒 1 百万帧或更高的速度,并且在曝光时间低于 1  $\mu$ s 的情况下,则需要使用出口控制的 FAST 选项。

**访问 [www.phantomcameras.cn/TMX](http://www.phantomcameras.cn/TMX), 了解有关 TMX 超高速摄像机系列的更多信息**

**提高了处理速度:**像素阵列的基本速度受阻容电路 (RC) 的时间常数限制,增加金属会降低电阻,从而提高速度。在 FSI 传感器中,传感器正面的金属限制了光线到达光电二极管。该限制导致了处理速度瓶颈。随着帧速率的增加和分辨率的降低,由于瓶颈限制,摄像机将无法产生最大的 Gpx/sec 吞吐量。而 BSI 传感器没有此限制,可以显著增加金属电路,从而大大减少甚至消除这一瓶颈。

# CMOS 成像传感器体系结构

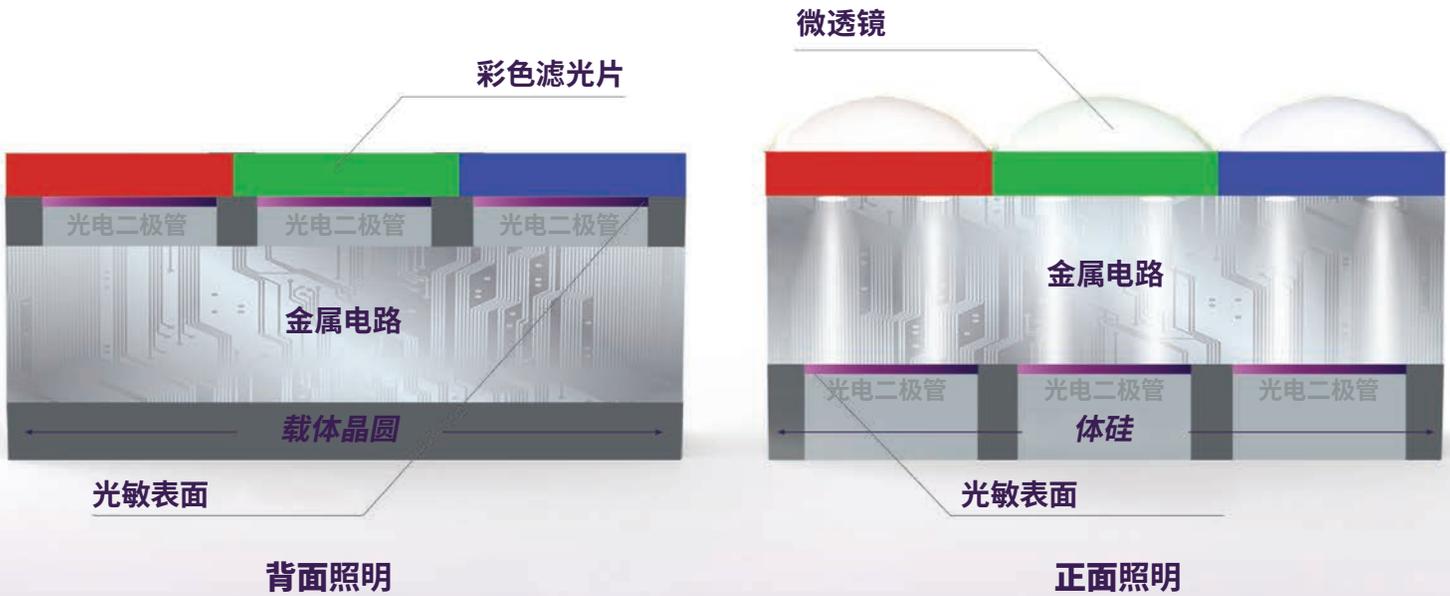


图 1: BSI 传感器通过提供直接路径, 使光线到达光接收表面来改善填充系数。

此功能使 BSI 传感器即使在非常高的帧速率/低分辨率组合下也能保持最大的 Gpx/sec 吞吐量。

BSI 传感器应用于各种手机和标准数码摄像机已长达 10 年之久。在改善这些以消费者为中心的摄像机低照度性能和动态范围方面, 它们表现出了公认的优势。为什么将这些传感器用于高速成像却需要如此长的时间, 一词即概之: 尺寸。

为了最大程度减少我们在速度、分辨率以及感光度之间的权衡, 高速摄像机中使用的传感器和像素远远大于标准摄像机。例如, 手机摄像机像素边长小于  $2\ \mu\text{m}$ , 但我们的成像传感器像素边长通常超过  $6\ \mu\text{m}$ , 有的高达  $28\ \mu\text{m}$ 。

BSI 传感器的制造过程本质上比同类 FSI 传感器难度大, 并且需要额外的制造步骤。其中包括晶圆背面减薄工艺, 以去除体硅, 使光电二极管更靠近光源。晶圆背面

还需要其他处理步骤, 以对表面进行退火, 并与正面进行电接触。高速成像传感器的尺寸只会加大制造难度。半导体经济的现状也使难以将大规模标准摄像机生产的技术转移到相对少量的高速成像传感器上。这需要花费时间来完善制造工艺并达到实际的产量。

BSI 成像传感器值得等待。它为以下几个方面树立了新的标准:

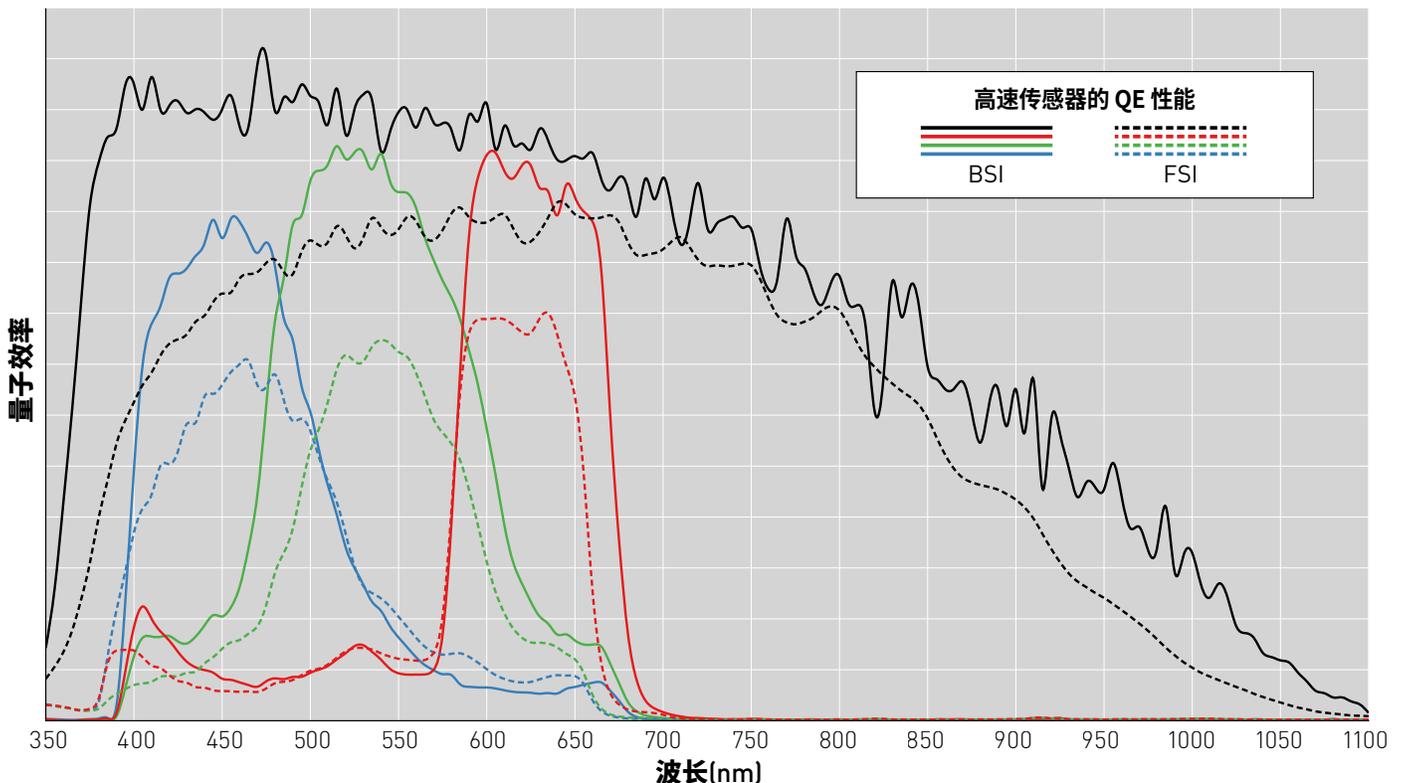
- **速度。**第一台使用该传感器的摄像机在 1 百万像素 ( $1280 \times 800$ ) 满分辨率下可达到以每秒 76,000 帧的速度捕获图像, 并且在降低分辨率和在像素融合模式下, 其速度可以提高一个数量级以上。例如, 摄像机在  $1280 \times 32$  和  $640 \times 64$  分辨率的组合模式下, 可达到每秒 175 百万帧的最高速度。从历史的角度来看, 与高于每秒一百万的帧速率相关的分辨率对几乎所有科学应用来说都太低了, 但是  $1280 \times 32$  却是可广泛应用的真正可用分辨率。

- **曝光时间。**新型传感器具有 FAST 选项(出口限制), 支持最低达 95 ns 的曝光时间, 是迄今为止同类产品中最快的曝光时间。快速的曝光时间使捕获瞬时细节成为可能, 而且不会出现运动模糊, 这一现象正是限制细胞计数和燃烧分析等广泛应用中获得高质量图像的一个可能因素。
- **像素大小。**为了在光线不足的条件下正常使用, 高速摄像机历来使用非常大的像素来捕获尽可能多的光子。例如, 我们现有的 FSI 超高速传感器像素边长为 28  $\mu\text{m}$ , 表面积为 784  $\mu\text{m}^2$ 。新型 BSI 高速成像传感器像素边长为 18.5  $\mu\text{m}$ , 但是其强大的光捕获能力使其感光度在速度上是早期 28  $\mu\text{m}$  像素 FSI 传感器的三倍。较小的像素还可以提高采样频率(奈奎斯特定律), 从而使传感器能够在混叠之前分辨出更高的 lp/mm 空间频率。此功能增强了成像系统在细胞流计数、粒子图像测速 (PIV)、数字图像相关 (DIC) 以及受传感器分辨率限制的其他高速应用中的性能。

## 在 BSI 之外

与新型成像传感器设计相关的性能突破主要取决于其 BSI 结构, 但更多的也与设计相关。新型传感器还具有许多特别的设计, 进一步提升了性能, 这是只依靠 BSI 结构无法做到的, 特别是能够以高速读取大量成像数据并能提高吞吐量。

## BSI 和 FSI 传感器的 QE 比较 单色和彩色



与 FSI 传感器相比, BSI 传感器在整个可见光谱范围内实现了更高的量子效率 (QE)。



**解决模数转换难题。**在 CMOS 成像传感器上嵌入模数转换器 (ADC) 是标准方法,但是 BSI 传感器的速度要求大量增加 ADC 的数量。现代 CMOS 成像传感器通常具有 1,000 至 10,000 个嵌入式 ADC,而新型 BSI 高速传感器则具有 40,000 个 ADC,每个 ADC 每 523 ns 转换一次,并生成大量数据以从传感器分流。为了完成此任务,新型 BSI 高速传感器集成了以超过 5 Gbps 的速度运行的 160 个高速串行输出。该技术普遍应用于 CPU 和 FPGA,但对于高速成像传感器却是新技术。

新型传感器上的 ADC 密度确实带来了功率管理和电气串扰方面的挑战,但这些挑战已在我们的设计和集成生产合作伙伴 Forza Silicon 的帮助下得以解决。虽然仿真通常用于预测传感器的性能,但该传感器需要通过仿真进行数周计算才能用于预测。Forza 在简化仿真和分析实际与预测结果,以进行快速设计修改方面具有丰富的经验。对于 BSI 传感器,早期设计的测试表明,在正常成像和像素融合模式下,ADC 串扰的程度均高于仿真工具的预测,从而导致图像中出现明显的伪影。Forza 工程师发现可对串扰的模式进行预测,因此开发了建模技术,帮助我们完全消除了串扰,从而减轻了成像伪影。

**在像素融合模式下实现最大吞吐量。**传感器支持 2 x 2 的像素融合模式,实现以更快的速度达到最大吞吐量。尽管这在高速传感器中并不常见,但我们已经在之前的两款摄像机中采用了像素融合模式。这有助于减轻传感器列 ADC 体系结构的局限性,从而达到比仅减小 y 维度更快的速度。这种方法与 CCD 摄像机中采用的像素融合方法稍有不同,在 CCD 摄像机中,主要用于提高感光度。而在新型传感器中,我们用于提高速度。

## BSI 的区别

BSI 并不是一项新技术,已在标准摄像机和手机摄像机应用中获得了巨大成功。通过将其应用于高速成像,使我们能够开发一种可在光线不足的情况下突破速度界限的传感器。

**如需了解更多信息,请访问**  
[www.phantomcameras.cn/TMX](http://www.phantomcameras.cn/TMX)

### 关于 Vision Research

Vision Research 是 AMETEK 公司材料分析部的业务部门,设计并制造高速摄像机。Phantom 摄像机以高感光度、高图像分辨率、采集速度和图像质量著称,这些特质对分析高速现象必不可少。

Vision Research 提供多款高速摄像机,满足不同行业的需求。用于研发的 VEO 系列由于简单、经济而在学术界备受欢迎。超高速系列能以最快的速度提供清晰的图像和准确的数据。Vision Research 近期还为机器视觉行业开发了新的流式摄像机系列,可用于实时分析和长时间记录。



某些 Phantom 摄像机需要出口许可证。有关更多信息,请访问 [www.phantomhighspeed.com/export](http://www.phantomhighspeed.com/export)