硅基光电探测器件及组件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20241203002

400万像素低弥散内线转移CCD图像传感器

程顺昌，杨　洪*，白雪平，黄　芳，刘　娅，张庆炜
（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 设计并研制了一款低弥散内线转移电荷耦合器件（ITCCD）图像传感器，其有效阵列规模为2 048×2 048元，像素尺寸为9 μm×9 μm。为降低器件弥散，采取了以下关键设计：首先，设计了垂直CCD p阱结构，通过在垂直CCD埋沟周围形成阻挡势垒，有效抑制了光生电子扩散至垂直CCD；其次，在光敏区集成微透镜阵列，优化入射光的会聚效果，减少杂散光进入垂直CCD沟道的可能性；此外，在垂直CCD区域设计了挡光金属钨层，实现了对光敏区外垂直CCD的全面覆盖。经测试，该器件弥散性低达－82 dB，可满足器件正常使用要求。

关键词： 弥散；微透镜；内线转移；电荷耦合器件；图像传感器
中图分类号： TN386.5　**文章编号：** 1001－5868(2025)01－0023－06

High-resolution Interline Transfer CCD Image Sensor with Low Smear

CHENG Shunchang, YANG Hong, BAI Xueping, HUANG Fang, LIU Ya, ZHANG Qingwei
(**Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN**)

Abstract: A low-smear interline transfer charge coupled device (CCD) image sensor, with an effective array size of 2 048×2 048 elements and a pixel size of 9 μm × 9 μm, was designed and developed. To achieve low-smear characteristics, a p-well was designed and fabricated to form a barrier around the vertical CCD buried channel, reducing the entry of photo generated electrons into the channel. A microlens array was designed and fabricated in the photosensitive region to converge incident light into the photosensitive region and reduce stray light entering the vertical CCD channel. A light-blocking tungsten metal cover was designed and produced for the vertical CCD outside the photosensitive area. After testing, the device dispersion reached －82 dB, which meets the normal use requirements of the device.

Key words: smear; microlens; IT transfer; CCD; image sensor

0　引言

对于内线转移CCD架构，像元主要由光敏区与垂直CCD构成，当入射光照射在光敏区时产生的一部分载流子会以扩散形式进入邻近垂直CCD；另外，入射光照射在光敏区表面时会通过折射形式“泄漏”至邻近垂直CCD，这些现象都会在垂直CCD产生不必要的光生电荷，导致内线转移CCD在对高亮目标成像时，会在高亮目标上、下区域形成拖影，这种现象即为弥散。值得注意的是，无论是高于饱和光照入射还是低于饱和光照入射内线转移CCD，这种弥散情况都会发生，尤其是在对高亮目标成像时，更容易通过肉眼观察到弥散现象[1-3]。弥散信号会随入射光强度的增加而增加，直接影响器件抗晕性能及动态范围，进而影响器件整体成像性能。

收稿日期：2024－12－03.
*通信作者：杨 洪

本文针对内线转移CCD实际工程应用中遇到的弥散问题，研究了器件弥散特性[4-7]，研制了2 048×2 048元低弥散内线转移CCD图像传感器。

1 器件设计

研制的芯片整体架构如图1所示，器件整体架构为内线转移CCD，光敏区有效像元数为2 048×2 048元，像元尺寸为9.0 μm(*H*)×9.0 μm(*V*)，光敏区左、右两侧各分布4列缓冲像元，上侧分布8行缓冲像元，下侧分布6行缓冲像元，光敏区左、右两侧各分布28列暗像元，光敏区底部有10行暗像元，读出放大器采用三级源跟随放大器。

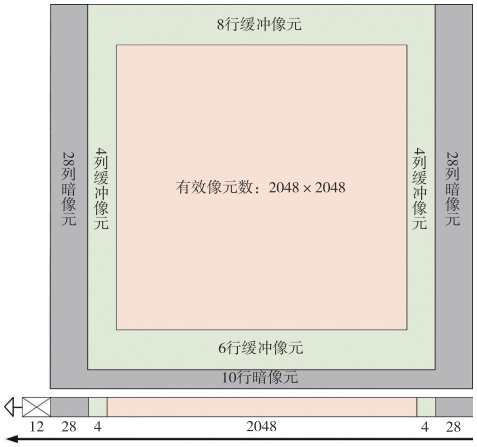
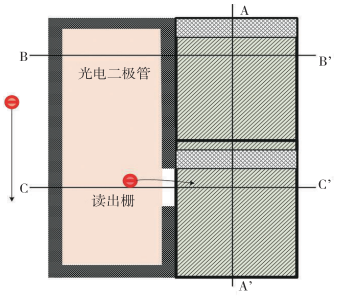


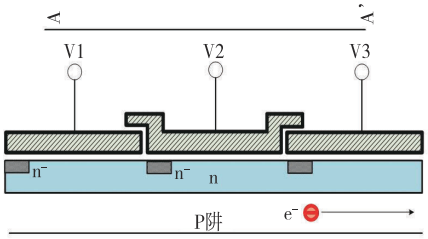
图1 器件整体架构

1.1 像元架构

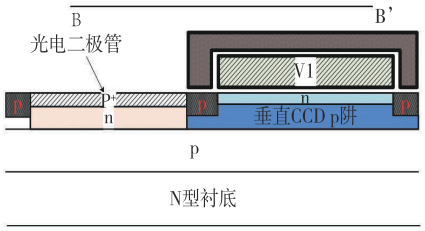
内线转移CCD像元结构如图2，器件基于N型衬底，如图2(a)所示像元主要由光电二极管、垂直CCD、沟阻构成；沿像元*AA*'剖面方向如图2(b)所示，垂直CCD为两相结构，每一相下面由势垒(n^-)、势阱相构成；沿像元*BB*'剖面方向如图2(c)所示，垂直CCD上由挡光金属覆盖，实现对入射光的遮挡；沿像元*CC*'剖面如图2(d)所示，光电二极管采用空穴积累二极管技术(Hole Accumulation Diode，HAD)，实现光生信号存储及降低暗电流的功能。



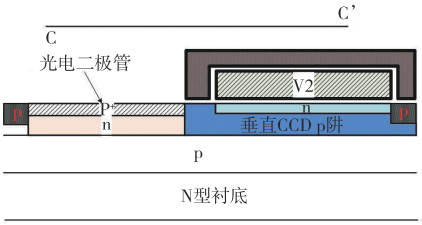
(a) 像元结构示意图



(b) *AA*'方向剖面图



(c) *BB*'方向剖面图



(d) *CC*'方向剖面图

图2 内线转移CCD像元结构

内线转移CCD弥散信号产生机制如图3所示，主要包括(a)光电二极管n型区域产生的光生电子通过扩散方式进入垂直CCD电荷信号；(b)和(c)入射光由于反射或者折射进入垂直CCD产生的光生信号；(d)斜入射光进入垂直CCD产生的信号。

弥散信号的存在会影响器件抗晕性能及动态范围，分析上述弥散信号产生机制，开展降低内线转移CCD弥散技术研究，降低器件弥散信号[8-9]。

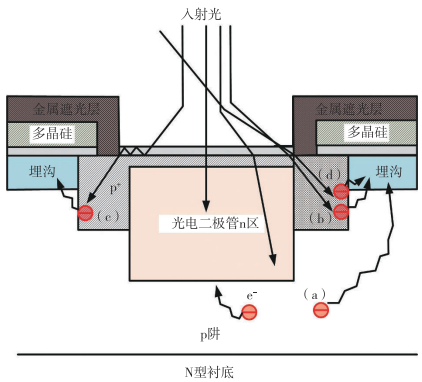


图3 内线转移CCD弥散信号产生示意图

1.2　垂直 CCD p 阱设计

为减少体内的光生电子扩散至垂直 CCD，在其扩散路径上设置一个阻挡势垒，阻止光生电子扩散至垂直 CCD 区域，为此可在垂直 CCD 区域设计制作如图 2(c)和(d)所示的垂直 CCD p 阱，形成的势垒高度计算式为：

$$\triangle V=\frac{kT}{q}\left(\ln\frac{N_A}{n_i}-\ln\frac{N_{A^-}}{n_i}\right) \tag{1}$$

式中，N_A 是垂直 CCD p 阱浓度，N_{A^-} 是衬底浓度，n_i 是本征载流子浓度。

基于器件仿真软件进行弥散特性模拟仿真，考虑到长波入射光对于弥散信号贡献更大，入射光波长设置为 900 nm。如图 4 所示为垂直 CCD p 阱注入剂量与弥散关系。

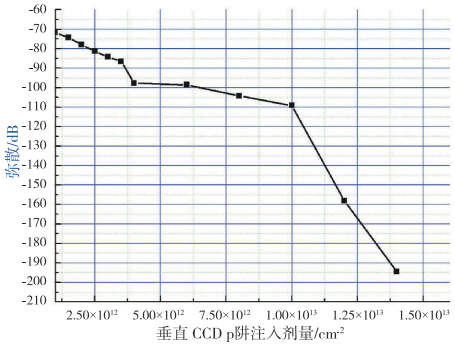


图 4　垂直 CCD p 阱注入剂量对弥散的影响

由图 4 可见，随着垂直 CCD p 阱注入剂量的增加，弥散性能得到相应改善，但随着垂直 CCD p 阱注入剂量的进一步增加，对于弥散性能的改善趋于“饱和”。但当剂量超过 8.0×10^{12} cm^{-2} 时，埋沟基本被完全复合，所以在设计垂直 CCD p 阱时，注入剂量设置在 4.0×10^{12} cm^{-2}。

当进行垂直 CCD p 阱设计时，除了关注剂量对于弥散的影响外，还应注意 p 阱注入能量对器件弥散性能的影响。从图 5 可以看出，随着注入能量的增加，弥散值降低，在注入能量大于 200 keV 后，弥散值的降低趋于“饱和”，但是当注入能量大于等于 600 keV 时，弥散值反而开始增加，所以在设计垂直 CCD p 阱时，注入能量设置为 200 keV。

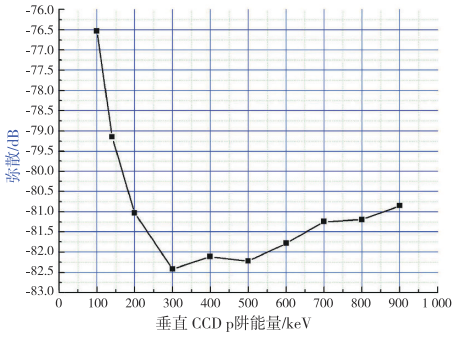


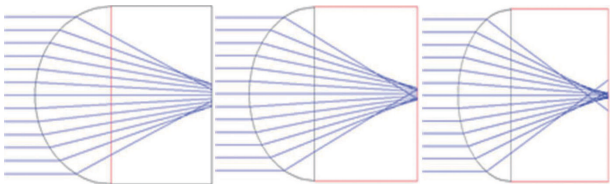
图 5　垂直 CCD p 阱注入能量对于弥散的影响

1.3　光敏区微透镜设计

为减少入射光通过反射、折射或斜入射方式进入垂直 CCD 产生弥散信号，在光敏区设计制作微透镜，目的是会聚入射光至光敏区，降低杂散光进入垂直 CCD 沟道。

该器件采用圆形球面折射型微透镜，微透镜的结构参数主要包括开口宽度、聚光长度和表面曲率。微透镜的开口宽度越大光学性能越好，其主要受工艺能力限制。微透镜结构的设计重点在于聚光长度和表面曲率的确定。

在微透镜的聚光长度方面，通过光学软件 ZEMAX 模拟计算获得。在几何光学框架下，当聚光长度尺寸范围为 5～7 μm 时，微透镜皆能将 90% 的入射光会聚到光敏区中心范围内。如图 6 为不同聚光长度下，微透镜几何光线的会聚情况。可以看出，当聚光长度为 6 μm 时，微透镜汇聚作用优于其余两种。



(a)5 μm　　(b)6 μm　　(c)7 μm

图 6　不同聚光长度微透镜几何光线会聚情况

微透镜的表面曲率会影响进入器件的光总量。根据菲涅尔定律，计算了该器件的 PMMA 微透镜曲率半径与进入到微透镜的光总量的关系，如图 7 所示。

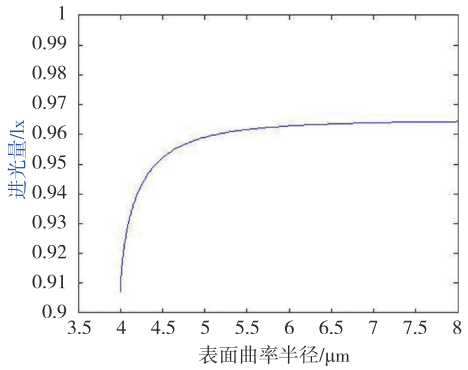


图 7　微透镜曲率半径与进光量关系

可以看出，当微透镜曲率半径在4.5 μm以上时，能够保证约95%的入射光都能够进入微透镜，并且随着曲率半径的变大，该比例变化不大，但是随着曲率半径的变小，进光量会急剧减小。考虑到实际曲率半径对微透镜焦距和器件制备工艺的影响，选择微透镜曲率半径约为4.5 μm

1.4 垂直CCD金属挡光设计

在内线转移CCD器件的制作过程中，发现垂直CCD的采用金属铝遮光性能不足，经过分析主要的原因在于经过多晶硅氧化和BPSG工艺后，遮光铝被垫高，光线容易从多晶硅侧面射入垂直CCD，从而产生弥散信号。针对金属铝台阶覆盖性不好的问题，采用金属钨材料在BPSG下面形成挡光层，对光敏区外的垂直CCD形成良好的覆盖。

如图8所示，相比金属铝，金属钨具有更好的台阶覆盖性，并且其反射率仅为金属铝的一半，因此用钨制作垂直CCD挡光层可以避免更多的入射光经反射进入垂直CCD。

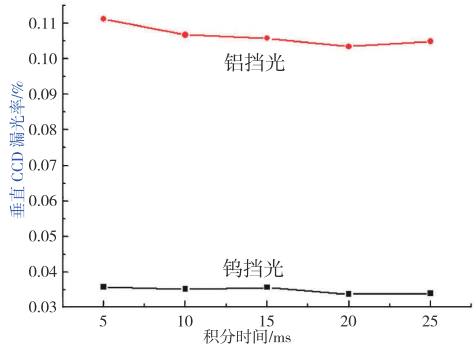


图8 垂直CCD金属钨挡光与铝挡光漏光率对比

2 器件制作

微透镜制作工艺是制作低弥散内线转移CCD的关键所在。选用亚克力(PMMA)作为微透镜材料，PMMA具有可见光波段高透射率，热学、化学、辐照高稳定性和成型工艺简单的特点。针对PMMA材料，选用热熔法作为微透镜成型工艺，热熔法具有设备要求低、工艺简单、成本低廉等优点。该器件采用PMMA刻蚀与热熔法制备微透镜阵列，其主要工艺流程如图9所示。其中，主要过程是通过采用干法刻蚀刻蚀出PMMA微透镜热熔前图形，如图9(e)所示；随后，采用热熔的方式，使PMMA图案在自身张力作用下形成如图9(f)所示的微透镜图形。

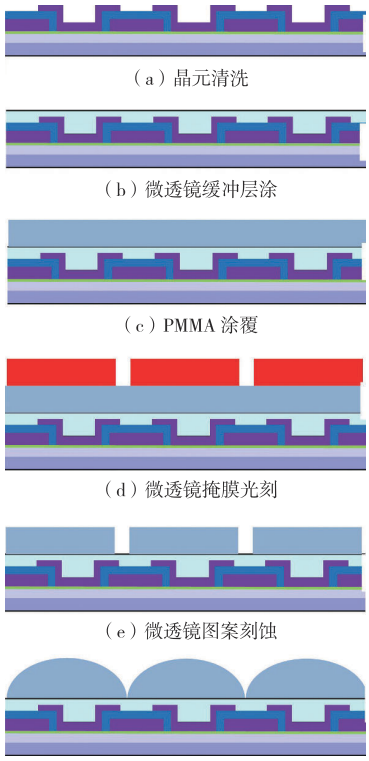


图9 微透镜制备工艺流程

集成微透镜的CCD形貌如图10所示，可以看出微透镜表面圆滑、形貌较好。

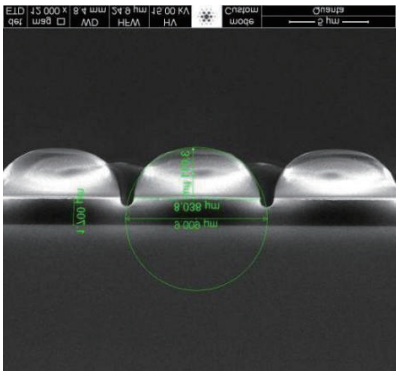


图10 集成微透镜CCD器件剖面图

器件采用6英寸、最小特征尺寸0.5 μm工艺制作，衬底采用电阻率4～7 Ω·cm的N型(100)硅。采用两层多晶硅和两次金属工艺，第一次金属铝用作电极，第二次金属钨用作垂直CCD挡光。如图11所示为陶瓷封装的内线转移CCD，器件有效像素为2 048×2 048元，像素尺寸为9 μm×9 μm，芯片尺寸为20.45 mm×19.56 mm。

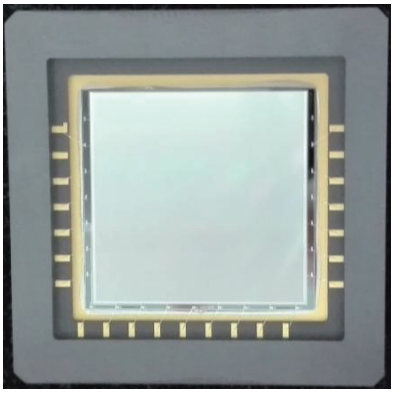


图 11　陶瓷封装器件

3　弥散特性测试

参照美国 ON Semiductor 公司对于内线转移 CCD 弥散测试方法[10-11]，采用如图 12 所示的方形光斑法评价内线转移 CCD 的弥散特性。光斑尺寸为器件垂直区高度的 9%～11%。通过测量图 12 所示弥散区、暗区、光斑区域的输出信号值，按照公式(2)进行弥撒计算：

$$Smr=\frac{V_{\mathrm{smear}}-V_{\mathrm{dark}}}{V_{\mathrm{spot}}-V_{\mathrm{dark}}} \tag{2}$$

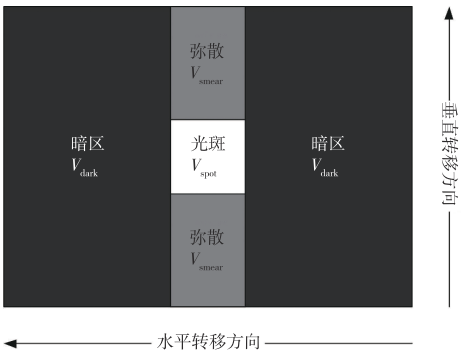


图 12　弥散测试所需的各个区域

器件实测光斑图像如图 13 所示。

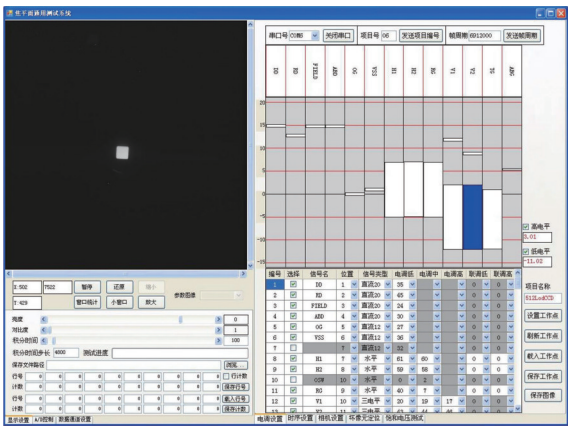


图 13　器件弥散测试光斑成像

按照 ON Semiductor 公司对于内线转移 CCD 弥散测试方法，统计图 13 中弥散区、暗区、光斑区域输出信号值，对应结果如表 1 所示。根据这些信号值计算弥散度，结果为－82 dB。

表 1　器件弥散测试结果

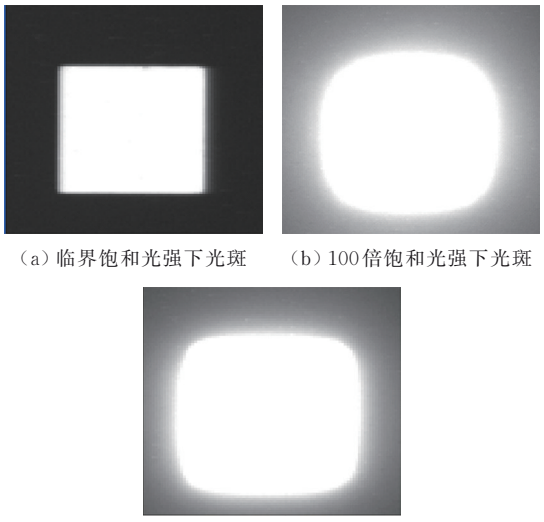
光斑区域计数/DN	弥散区域计数/DN	暗场区域计数/DN	弥散/dB
V_{spot}	V_{smear}	V_{dark}	
52 400	2 312	2 308	－82

4　器件性能参数

表 2 列出了 2 048×2 048 元低弥散内线转移 CCD 图像传感器的主要性能参数。如表 2 所示，器件电荷转换灵敏度为 9.7 μV/e⁻，弥散为－82 dB，饱和输出幅度为 770 mV，满阱电子数为 80 ke⁻。如图 14 为 2 048×2 048 元低弥散内线转移 CCD 抗晕成像图，可以看出，得益于器件所具备的低弥散特性，器件能够实现 200 倍的抗晕性能，表明器件具备较好的抗弥散、抗光晕特性[12-13]。

表 2　内线转移纵向抗晕 CCD 主要性能参数

参数	数值
有效像元数	2 048×2 048 元
像元尺寸	9 μm×9 μm
电荷转换灵敏度	9.7 μV/e⁻
弥散	－82 dB
抗晕倍数	200 倍
饱和输出幅度	770 mV
满阱容量	80 ke⁻



(a) 临界饱和光强下光斑　(b) 100 倍饱和光强下光斑

(c) 200 倍饱和光强下光斑

图 14　器件抗晕光斑测试成像

5 结论

设计了一款2 048×2 048元低弥散内线转移CCD图像传感器，开展了内线转移器件弥散特性研究，通过采取垂直CCD p阱、光敏区微透镜阵列、垂直CCD金属钨挡光设计与制作措施，可以有效降低器件表面、体内的光生信号进入垂直CCD，减少器件弥散信号的产生，经测试，器件弥散达到－82 dB。同时，得益于器件所具备的低弥散特性，器件能够实现200倍的抗晕性能。器件具备较好的抗弥散、抗光晕特性，可以满足器件正常使用要求。

参考文献：

[1] van de Steeg M J H, Peek H L, Bakker J G C, et al. A frame transfer CCD color imager with vertical anti-blooming [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1985, 32(8): 1430-1438.

[2] Furukawa A, Matsunaga Y, Suzuki N, et al. An interline transfer CCD for single sensor 2/3" color camera [C]// International Electron Devices Meeting, 1980: 346-349.

[3] Oda E, Ishihara Y, Teranishi N. Blooming suppression mechanism for an interline CCD image sensor with a vertical overflow drain [C]// International Electron Devices Meeting, 1983: 501-504.

[4] White M H, Lampe D R, Blaha F C, et al. Characterization of surface channel CCD imaging arrays at low light levels [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1974, 9(1): 1-13.

[5] Akiyama I, Kohno A, Teranishi N. Noise characteristics of an interline CCD image sensor [C]//Proceedings of the Conference on Television Society, 1983: 57-58.

[6] Losee D L, Cassidy J C, Mehra M, et al. A 1/3 format image sensor with refractory metal light shield for color video applications [C]//IEEE International Solid-State Circuits Conference, 1989: 90-91.

[7] Teranishi N, Kohono A, Ishihara Y, et al. No image lag photodiode structure in the interline CCD image sensor [C]// International Electron Devices Meeting, 1982: 324-327.

[8] Haradaeta K, Negishi M. Ohgishi T, et al. A 2/3-inch 2M pixel FIT-CCD HDTV image sensor [C]//IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers, 1992: 170-171.

[9] Hosack H H, Hynecek J. Clock controlled anti-blooming for virtual phase CCD's: 82300746.3 [P]. 1982-02-15.

[10] Theuwissen A J P. Solid-State Imaging with CCDs [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995

[11] ON Semiconductor. Interline CCD Smear [R/OL]. [2024-12-03]. https://www.onsemi.cn/download/application-notes/pdf/and9184-d.pdf

[12] 钟玉杰，杨 洪，易学东，等. 1 024×1 024元帧转移纵向抗晕CCD图像传感器[J]. 半导体光电，2023，44(1)：14-17.
Zhong Yujie, Yang Hong, Yi Xuedong, et al. 1 M frame transfer CCD image sensor with vertical antiblooming [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(1): 14-17.

[13] 唐遵烈，李博乐，周建勇，等. CCD电荷转换因子通用测试方法研究[J]. 半导体光电，2023，44(2)：199-203.
Tang Zunlie, Li Bole, Zhou Jianyong, et al. Study of a general testing scheme of the CCD's charge to voltage factor [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(2): 199-203.

作者简介：

程顺昌(1983—)，男，高级工程师，主要从事CCD图像传感器研究工作；

杨 洪(1982—)，男，高级工程师，主要从事CCD器件的设计研究工作。