硅基光电探测器件及组件

DOI:10.16818/j.issn1001－5868.20241215001

1 920×1 080元高灵敏行间转移CCD图像传感器

李 金[1*]，杨 洪[1]，孙 晨[1]，熊圆圆[2]，田智文[2]

（1. 重庆光电技术研究所，重庆 400060；2. 中国航天标准化研究所，北京 100071）

摘 要： 为解决小像元行间转移电荷耦合器件（ITCCD）的电荷转换灵敏度低以及强光照射下出现的光晕问题，对行间转移CCD器件拓扑结构、像元抗晕结构、片上读出电路以及工艺等技术进行研究，设计并研制了一款高清行间转移CCD图像传感器，器件有效阵列规模为1 920×1 080元，像素尺寸为7.4 μm×7.4 μm。测试结果表明，器件突破了1.0 μm多晶硅栅长放大器设计及制作技术，器件电荷转换灵敏度可至22.4 μV/e⁻，饱和电压输出为1 300 mV。为实现抗晕功能，器件采用了n型埋沟-鞍形p阱-n型衬底纵向抗晕结构，器件抗晕能力达200倍，可满足器件在复杂光照环境下高灵敏成像要求。

关键词： 电荷转换灵敏度；纵向抗晕；行间转移；电荷耦合器件；CCD图像传感器

中图分类号： TN386.5；TP212.1 **文章编号：** 1001－5868(2025)01－0010－06

A 1 920×1 080 Interline Transfer CCD Image Sensor with High Output Sensitivity

LI Jin[1], YANG Hong[1], SUN Chen[1], XIONG Yuanyuan[2], TIAN Zhiwen[2]

(1. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN;
2. China Aerospace Standardization Research Institute, Beijing 100071, CHN)

Abstract: In order to solve the problem of low charge conversion sensitivity and blooming under strong light irradiation of small pixel inter-line transfer charge-coupled device (ITCCD), the topology of inter-line transfer CCD device, pixel anti-blooming structure, on-chip readout circuit and process technology were studied, and a high-resolution interline transfer CCD image sensor was designed and developed, with an effective array size of 1 920×1 080 yuan and a pixel size of 7.4 μm×7.4 μm. The test results show that the device breaks through the design and fabrication technology of 1.0 μm polysilicon gate length amplifier, and the charge conversion sensitivity of the device can reach 22.4 μV/e⁻, and the saturation voltage output is 1 300 mV. In order to realize the anti-blooming function, the device adopts the vertical anti-blooming structure of n-type buried channel-saddle p well-n-type substrate, and the anti-blooming ability of the device is 200 times, which can meet the requirements of high-sensitivity imaging of the device in complex lighting environments.

Key words: charge conversion sensitivity; vertical antiblooming; IT; charge-coupled device; CCD image sensor

0 引言

行间转移CCD主要用于可见光探测，为了提高器件对于探测目标分辨率，行间转移CCD像元向着小尺寸架构发展。在对地遥感等应用中，目标景物光强变化范围大，要求行间转移CCD在强光、常规光照环境下都可以摄取清晰的图像。行间转移CCD像元尺寸的减小势必影响器件灵敏度等性能，

收稿日期：2024－12－15.

*通信作者：李 金

导致在常规光照环境下不能有效实现目标景物清晰成像；另一方面，当行间转移 CCD 在强光环境下工作时，像元区域产生过剩光生载流子，会溢出至临近像元，导致光晕现象。因此，小尺寸像元行间转移 CCD 在常规光照条件下具有高灵敏度性能的同时，在强光条件下还需具备抗晕能力[1-3]。

国外 Sony 和 ON Semi 等厂商对于高灵敏行间转移 CCD 图像传感器的研究已经成熟，能够提供多款货架产品，但多款高性能的产品对国内禁运。国内对于高灵敏行间转移 CCD 图像传感器的研究较少，主要研究重点集中在帧转移 CCD 结构，而对高灵敏行间转移 CCD 图像传感器的研究尚未见报道。

本文针对小尺寸像元行间转移 CCD 实际工程应用问题，研究了器件电荷转换灵敏度及纵向抗晕特性[4-11]，研制出 1 920×1 080 元高灵敏行间转移纵向抗晕 CCD 图像传感器。

1　结构设计

针对目标探测高灵敏、高分辨率以及抗光晕成像要求，设计了具有高电荷转换效率、纵向抗晕功能的小像元百万像素 CCD 器件架构方案，对器件拓扑结构、像元抗晕结构、片上读出电路以及相关工艺等技术进行了研究。首先进行高电荷转换灵敏度放大器设计，再进行行间转移 CCD 纵向抗晕设计，开展器件工艺流片，研制出 1 920×1 080 元高灵敏行间转移 CCD 图像传感器样品。

研制的芯片整体架构如图 1 所示。器件整体架构为行间转移 CCD，光敏区有效像元数为 1 920×1 080，像元尺寸 7.4 μm（H）×7.4 μm（V），光敏区左、右各 4 列缓冲像元，上、下各 2 行缓冲像元，左、右各 28 列暗像元，光敏区顶部、底部各有 4 行暗像元，读出放大器采用三级源跟随放大器。

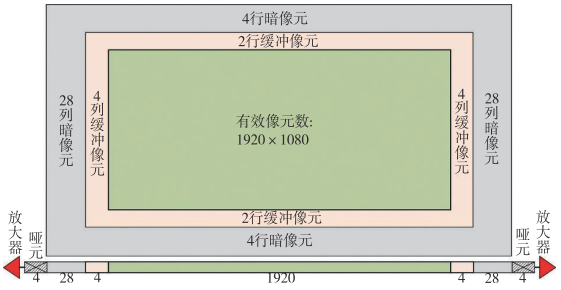


图 1　器件整体架构

1.1　高电荷转换灵敏度放大器设计

放大器电荷转换灵敏度 S_V 计算式为：

$$S_V = q/C_S \tag{1}$$

$$C_S = C_{MOS} + C_{FD} \tag{2}$$

式中，C_S 是输出节点电容，q 是电荷电量，C_{MOS}，C_{FD} 分别是放大器栅电容、浮置扩散电容。

基于公式（1）和（2）可以看出，提高放大器电荷转换灵敏度 S_V 需要减小放大器栅电容 C_{MOS}、浮置扩散电容 C_{FD}。放大器栅电容 C_{MOS} 主要受第一级放大器驱动管栅极电容影响，降低放大器驱动管栅极电容可通过减小栅长实现，同时需确保放大器不会因为栅长减小导致源漏穿通，进而影响放大器的直流增益特性。浮置扩散电容 C_{FD} 受节点面积影响，在工艺能力允许情况下，节点面积越小，浮置扩散电容 C_{FD} 越小。

高电荷转换灵敏度放大器版图如图 2 所示，器件第一级放大器驱动管栅长设计为 1.0 μm，输出节点尺寸为 3.0 μm（H）×2.0 μm（V），输出节点接触孔尺寸为 1.0 μm×1.0 μm。

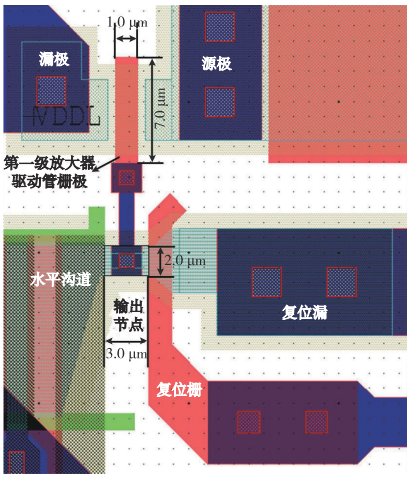
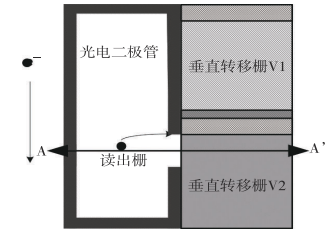


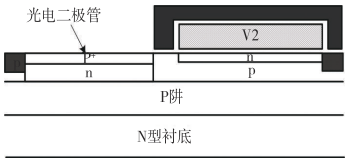
图 2　高电荷转换灵敏度放大器版图

1.2　行间转移 CCD 纵向抗晕设计

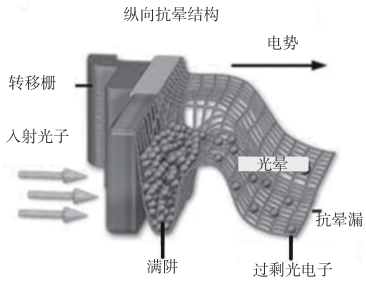
为了实现器件在强光应用场合的抗光晕功能，器件光敏区像元采用了内线转移 CCD 纵向抗晕设计，像元架构示意图如图 3 所示。器件基于 N 型衬底制作，纵向抗晕结构由光电二极管 n 型层、p 阱以及 N 型衬底构成，光电二极管 n 型层作为穿通晶体管的发射极，p 阱作为基极，N 型衬底作为集电极。过剩光生载流子进入衬底形成穿通电流，实现器件纵向抗晕功能。



（a）2相转移行间CCD像元架构



（b）沿*AA'*方向剖面图



（c）行间转移CCD纵向抗晕机理

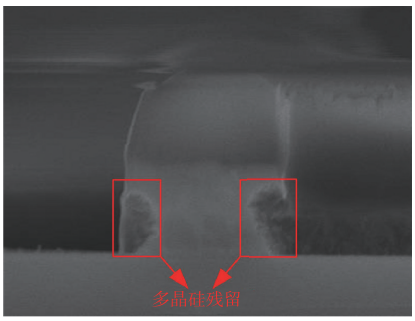
图3 行间转移CCD像元结构及抗晕机理

2 器件制作

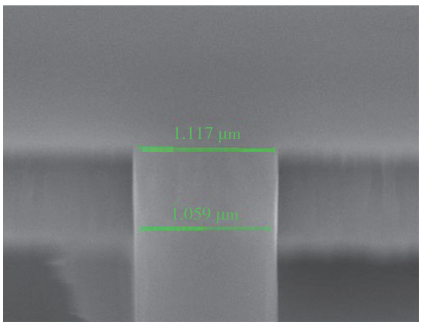
器件采用6英寸、最小特征尺寸0.5 μm工艺制作，衬底采用电阻率4～7 Ω·cm的N型(100)硅。关键工艺包括放大器1.0 μm多晶硅栅长制作工艺、1.0 μm×1.0 μm接触孔制作工艺、行间转移CCD纵向抗晕p阱工艺。

2.1 1.0 μm多晶硅栅长放大器制作工艺

行间转移CCD第一级放大器驱动管1.0 μm多晶硅栅长制作工艺是高电荷转换灵敏度放大器制作关键。为满足栅极多晶硅形貌要求，在常规多晶硅刻蚀工艺的基础上，从刻蚀菜单的气体压力、气体配比、磁场大小等方面进行工艺优化。经过工艺优化后，多晶硅刻蚀时对氮化硅的选择比明显提高，由19∶1提高到70∶1，氮化硅消耗量由55 nm降低到15 nm，消除了多晶硅残留，并降低了栅极对地漏电可能性。工艺优化前后多晶硅刻蚀形貌如图4，可以看出，工艺优化前(图4(a))多晶硅有明显的刻蚀残留，工艺优化后(图4(b))多晶硅残留消失，且线宽的偏差小于0.1 μm，满足刻蚀精度要求。



（a）优化前多晶硅刻蚀形貌



（b）优化后多晶硅刻蚀形貌

图4 多晶硅刻蚀形貌对比

2.2 1.0 μm×1.0 μm接触孔制作工艺

输出节点1.0 μm×1.0 μm接触孔是实现输出节点电容有效电学连接关键。输出节点区域氧化层厚度约为1.0 μm，对于1.0 μm×1.0 μm接触孔，在1.0 μm氧化层上采用传统的直孔刻蚀工艺将会形成高深宽比的接触孔，导致金属无法填充到接触孔底部，如图5所示。

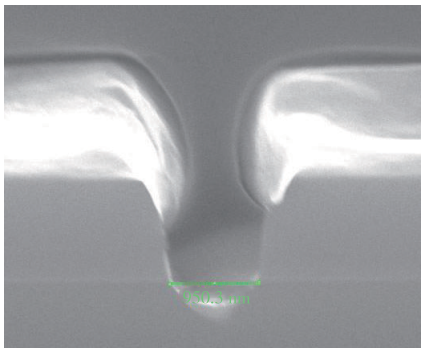


图5 1.0 μm×1.0 μm直孔的金属填充效果

可以看出，1.0 μm×1.0 μm直孔的金属填充效果差，接触孔最上部有1/4的区域有金属覆盖，中下部绝大多数区域都没有金属填充，这会造成欧姆接触特性和可靠性不佳。金属覆盖不好是由于接触孔的顶部开口窄，金属难以填充到底部。为改善这一情况，针对接触孔工艺开发了碗口刻蚀技术，即

在接触孔的顶端用各向同性刻蚀技术刻蚀出类似于碗口的形貌，再用各向异性刻蚀技术刻蚀出下面的直孔。碗口部分的侧壁为曲面，直孔部分的侧壁为斜面，有利于金属原子迁移，改善金属填充效果。

如图6为1.0 μm接触孔碗口刻蚀形貌图。可以看出，接触孔底部宽度为1.07 μm，上口宽度为2.3 μm，碗口刻蚀深度大，有利于金属Al填充，且碗口形貌标准、孔侧壁平滑，有利于提高金属Al的台阶覆盖率。

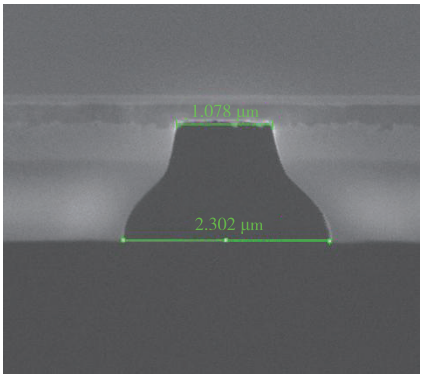


图6　1.0 μm×1.0 μm接触孔碗口刻蚀形貌图

如图7展示了1.0 μm接触孔的金属Al填充效果，金属台阶覆盖性好，侧壁最薄处金属厚度达300 nm以上，可保证芯片的可靠性，具备了最小接触孔尺寸1 μm×1 μm的工艺能力。

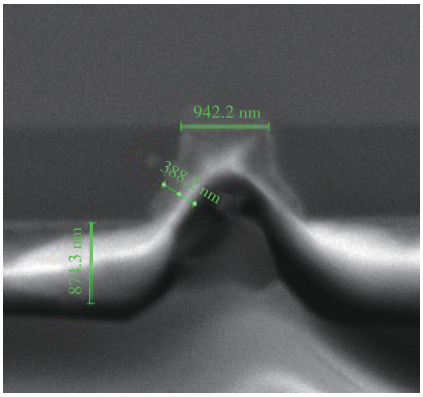
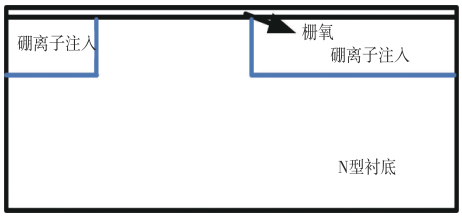


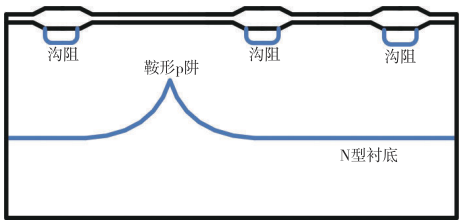
图7　1.0 μm接触孔的金属Al填充效果

2.3　行间转移CCD纵向抗晕工艺

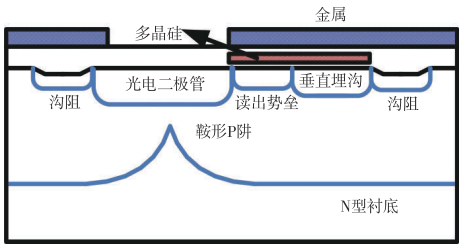
光敏区鞍形p阱工艺是CCD实现抗晕性能的关键。该器件采用高温推结硼离子横向扩散的方式形成光敏区鞍形p阱分布，通过调整推结时间、推结温度，可以比较灵活地控制光敏区马鞍形p阱浓度、结深，与其他区域的p阱掺杂浓度、结深相比，光敏区鞍形p阱掺杂浓度、结深都会更低。在衬底施加抗晕电压时，光敏区鞍形p阱会耗尽，使得多余的光生载流子通过光敏区抗晕势垒进入衬底，实现抑制光晕的作用。其光敏区鞍形p阱工艺流程如图8所示，首先在像元局部区域进行如图8(a)所示硼离子注入，通过高温推结形成如图8(b)鞍形掺杂分布，再进行如图8(c)光电二极管、垂直埋沟、多晶硅等后续工艺。



(a) 硼离子局部注入



(b) 硼离子高温扩散形成p阱



(c) 光电二极管、垂直埋沟等后续工艺

图8　p阱制作工艺

如图9为所制作的1 920×1 080元行间转移纵向抗晕CCD的6英寸晶圆。图10为陶瓷封装的行间转移纵向抗晕CCD，器件有效像素为1 920×1 080元，像素尺寸为7.4 μm×7.4 μm，芯片尺寸为15.28 mm×9.29 mm。

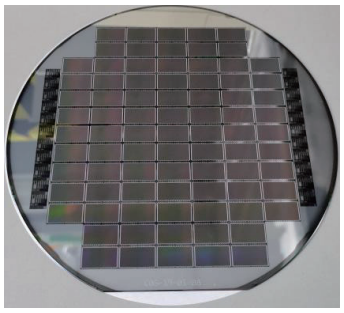


图9　行间转移纵向抗晕CCD的晶圆

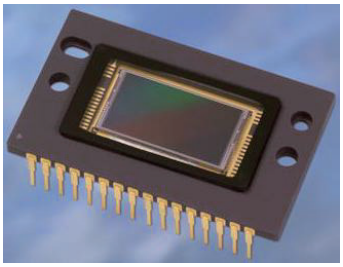


图10 陶瓷封装行间转移纵向抗晕CCD

3 特性测试

3.1 高电荷转换灵敏度放大器性能测试

通过测试放大器直流增益特性表征器件能否正常工作，第一级驱动管栅长为1.0 μm的放大器直流增益特性测试结果如图11所示。测试放大器结果表明，当放大器第一级驱动管栅长为1.0 μm时，放大器直流输出电平大约为7.5 V，直流增益为0.69，曲线形貌正常，表明放大器可正常工作。

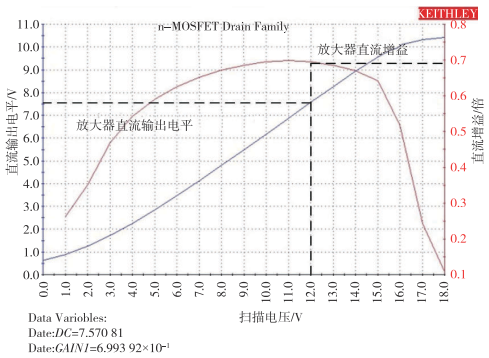


图11 放大器直流增益特性测试

该放大器的行间转移CCD电荷转换灵敏度S_V测试结果如图12所示，测试结果表明该器件电荷转换灵敏度曲线形貌正常，电荷转换灵敏度为22.4 μV/e⁻。

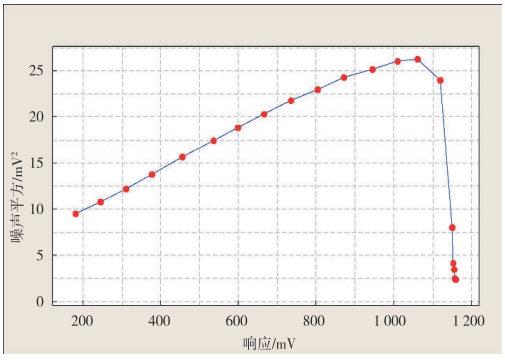


图12 器件电荷转换灵敏度测试

3.2 抗晕性能测试

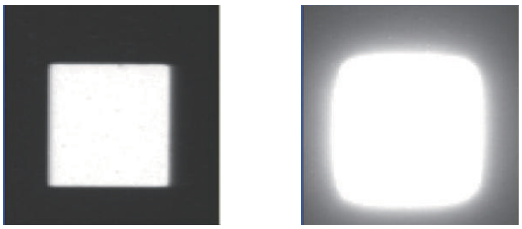
通常情况下，采用方形光斑法评价行间转移纵向抗晕CCD的抗晕特性。光斑尺寸为器件垂直区高度的9%～11%，用抗晕倍数X表示器件的抗晕能力：

$$X = I_{光晕}/I_{饱和} \tag{3}$$

式中，$I_{光晕}$为光晕光强，$I_{饱和}$为饱和光强。

当进行行间转移纵向抗晕CCD抗晕性能测试时，调整入射光强使得照射至器件的光斑处于临界饱和状态，记录此时光强$I_{饱和}$；随后增加入射光强直至方形光斑尺寸扩展为原始光斑2倍，记录此时光强$I_{光晕}$，由此可得器件抗晕倍数。

器件纵向抗晕性能测试如图13所示。图13(a)为临界饱和时光斑成像，光斑尺寸为100像素×100像素；图13(b)为增大光强至100倍临界饱和状态时光斑成像，此时光斑尺寸为100像素×119像素，相比于临界饱和时光斑垂直方向尺寸，光斑扩展了19个像素；图13(c)为增大光强至200倍临界饱和状态时光斑成像，此时光斑尺寸为100像素×138像素，相比于临界饱和时光斑垂直方向尺寸，光斑扩展了38个像素，按照光斑扩展2倍要求，此时扩展像素小于100像素，表明器件抗晕倍数优于200倍。



(a) 临界饱和状态 (b) 100倍饱和状态



(c) 200倍饱和状态

图13 器件抗晕性能测试

4 器件性能参数

表1列出了1 920×1 080元高灵敏行间转移CCD图像传感器的主要性能参数。如表1所示，器

件电荷转换灵敏度为22.4 μV/e⁻，抗晕能力为200倍，饱和输出幅度为1 300 mV，满阱电子数为58 ke⁻。如图14为1 920×1 080元高灵敏行间转移CCD靶标成像图，可以看出，得益于7.4 μm小像元器件所具备的高电荷转换灵敏度特性，器件能够清晰反映出靶标明暗线条，表明器件具备较好的光响应特性。

表1　行间转移纵向抗晕CCD主要性能参数

测试参数	数值
有效像元数	1 920×1 080元
像元尺寸	7.4 μm×7.4 μm
电荷转换灵敏度	22.4 μV/e⁻
抗晕倍数	200倍
饱和输出幅度	1 300 mV
满阱容量	58 ke⁻

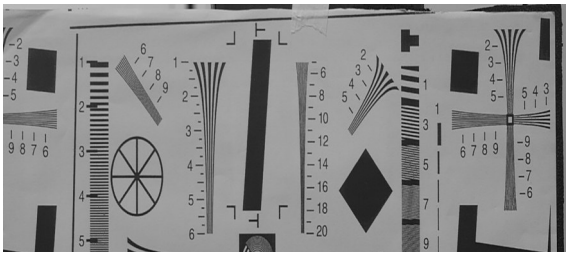


图14　器件靶标成像

5　结论

本文研制了1 920×1 080元高灵敏行间转移CCD图像传感器，解决了小像元行间转移CCD器件灵敏度低以及强光应用下的光晕问题。该器件有效像元数为1 920×1 080元，像元尺寸为7.4 μm×7.4 μm，为实现高电荷转换灵敏度特性，器件采用了1.0 μm多晶硅栅长放大器设计，器件电荷转换灵敏度可至22.4 μV/e⁻，饱和电压输出可至1 300 mV。另一方面，为实现纵向抗晕功能，采用了n型埋沟-鞍形p阱-n型衬底结构，器件抗晕能力为200倍，可以满足器件在强光下的抗光晕要求。

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] 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.

[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] 李　明，黄　芳，刘戈扬，等. 高速数字化三维集成式CCD-CMOS图像传感器[J]. 半导体光电，2024，45(2)：388-394.
Li Ming, Huang Fang, Liu Geyang, et al. A high-speed, digitized, 3D-integrated CCD-CMOS image sensor [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(2): 388-394.

[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] 钟玉杰，雷仁方，林珑君，等. 激光退火在背照式CCD图像传感器中的应用研究[J]. 半导体光电，2023，44(2)：241-244.
Zhong Yujie, Lei Renfang, Lin Longjun, et al. Applications of laser annealing in backside-illuminated CCD image sensor[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(2): 241-244.

[8] Haradaeta K, Negishi M, Ohgishi T, et al. A 2/3-inch 2 M 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] 李　立. CCD图像传感器输出节点电荷容量设计[J]. 半导体光电，2022，43(4)：777-780.
Li Li. Design for charge handling capacity of sense node in CCDs [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(4): 777-780.

作者简介：

李　金(1982—)，男，高级工程师，主要从事CCD器件设计与测试技术研究。