光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022022601

四谱段 TDICCD 图像传感器的设计与制作

徐道润*，刘业琦，袁安波，廖乃镘，曲鹏程，罗春林，张晓琴

（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 设计并研制了一种四谱段时间延迟积分电荷耦合器件（TDICCD）图像传感器，器件将四个 TDICCD 集成在同一芯片上，通过在光窗对应位置上镀不同的窄带滤光膜实现多谱段分光。该 TDICCD 图像传感器的像元尺寸为 28 μm×28 μm，水平寄存器的有效像元数为 3 072 元，行频为 10 kHz，电荷转移效率高达 0.999 99，饱和输出电压为 2 650 mV，抗弥散能力大于等于 100 倍，动态范围为 7 143∶1。

关键词： 时间延迟积分；四谱段；电荷耦合器件；图像传感器

中图分类号： TN386　**文章编号：** 1001－5868(2022)03－0547－05

Design and Fabrication of Four Spectral TDICCD Image Sensor

XU Daorun, LIU Yeqi, YUAN Anbo, LIAO Naiman, QU Pengcheng, LUO Chunlin, ZHANG Xiaoqin

(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: A kind of four spectral time-delay-integrated charge coupled device (TDI CCD) is designed and fabricated by integrating four TDICCDs on one chip. Different narrow-band filter films are plated on the corresponding positions of the light window to realize multi-band light splitting. For the designed TDICCD, its pixel size is 28 μm×28 μm, the horizontal pixel size is 3 072 elements, the line frequency is 10 kHz, the charge transfer efficiency is 0.999 99, the saturation output voltage is 2 650 mV, the anti-blooming ability is more than 100×, and the dynamic range is 7143∶1.

Key words: time delay integration; four spectral; CCD; image sensor

0　引言

TDICCD 图像传感器可根据目标景象光的强弱，通过调节器件 TDI 级数，获得相应光强下目标的最佳图像。利用 TDI 级数选通和信号累加功能，实现光生信号的累加，达到提高器件的响应率和信噪比的目的，在航空、航天对地遥感领域具有广泛的应用。多光谱 TDICCD 图像传感器通过带有滤光片的光窗进行分光，实现多光谱探测，避免了棱镜分光或多镜头系统[1]，可显著减小相机重量、体积和成本，是高分辨率遥感相机首选的核心部件。

四谱段 TDICCD 图像传感器具有四谱段成像、高行频、低噪声和大动态范围的特点，主要应用于现代农业、环境减灾、资源探测等高灵敏度丰富图像数据获取[2-6]。本文研究了四谱段 TDICCD 拓扑结构、像元、高行频等器件结构设计，研制了成像器件样品。

收稿日期：2022－02－26.

* **通信作者：**徐道润　**E-mail：**403236274@qq.com

1　器件结构设计

1.1　总体结构设计

四谱段 TDICCD 芯片结构如图 1 所示，从上到下分别为 B1～B4 四个谱段，每个谱段是一个 TDICCD 图像传感器，都分为垂直感光区和水平寄存器区，且每个谱段垂直区均是从上到下进行电荷转移。器件像元尺寸为 28 μm×28 μm，水平寄存器的有效像元数为 3 072 元，左右两边各有 8 个暗像元和 6 个隔离列，垂直感光区与水平寄存器区有 2

行过渡行;B1～B4 谱段垂直方向的最大有效像元数分别为 144 元、60 元、48 元和 36 元,可以根据实际成像目标,通过控制 TDI 级选通数来选择最佳有效像元数(小于最大有效像元数)。每个谱段可以选择都从左边或右边输出端输出(输出像元数是 3 072 元),也可以左边和右边同时输出(每个输出端输出像元数各 1 536 元)。

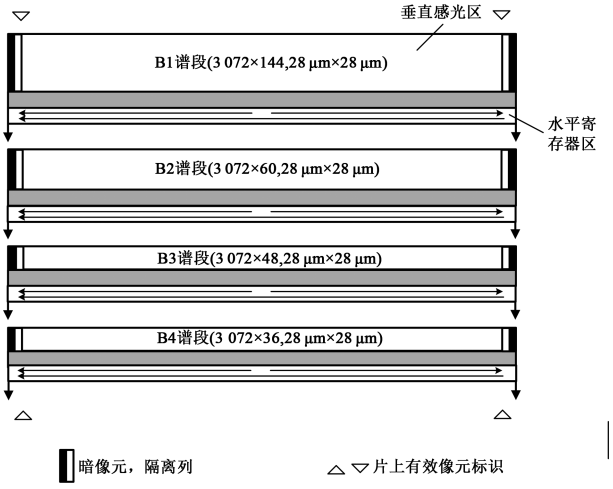


图 1 四谱段 TDICCD 芯片结构示意图

1.2 垂直感光区像元结构设计

图 2 为四谱段 TDICCD 垂直感光区像元结构。在每两列像元之间设计了抗弥散势垒和溢出漏来替代传统 CCD 两列像元之间的沟阻,抗弥散势垒和溢出漏组成 TDICCD 横向抗弥散结构,没有抗弥散控制栅,其剖面结构如图 3 所示。在抗弥散势垒和溢出漏结构上面是垂直感光区的 CI1,CI2,CI3 和 CI4 多晶硅转移栅。抗弥散势垒和溢出漏的宽度总和为 2 μm,仅占像元面积的 7.1%,极大地提高了占空

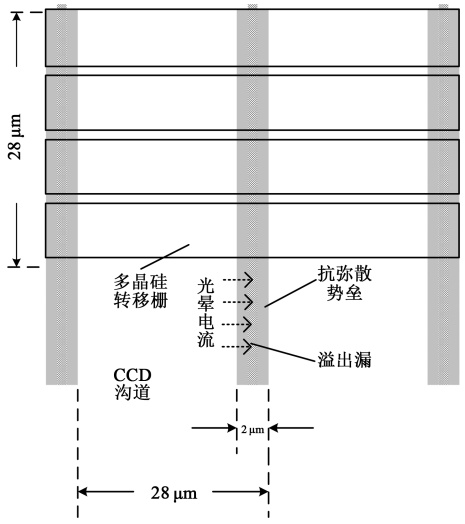


图 2 垂直感光区像元结构示意图

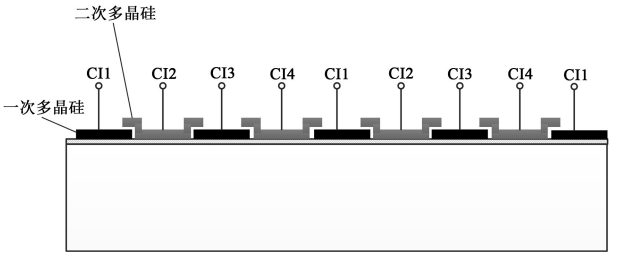


图 3 垂直区剖面结构示意图

比。在溢出漏施加直流偏置电压,当每一列像元光生信号电荷超过 CCD 满阱容量时,过剩的信号电荷越过每列像元左边或右边的抗弥散势垒经由溢出漏排出,形成光晕电流,从而达到抗弥散的目的。这种像元结构的横向抗弥散能力主要由横向抗弥散势垒宽度、注入剂量和溢出漏电压决定,CI1～CI4 多晶硅转移栅电压的影响相对较小。另外,溢出漏处于两列像元之间,两列像元间隔区域产生的光生电荷被溢出漏排走,一列像元边缘的光生电荷不会扩散到另一列像元,可以显著提高水平方向调制传递函数 MTF。

图 4 为电极结构示意图。B1～B4 谱段垂直感光区驱动承接关系为:CI1→CI2→CI3→CI4→CI1→CI2→CI3→CI4(或级数选通栅CSSXX)…CI1→CI2→CI3→CI4→TCK→水平移位寄存器 CR2→CR3→CR4→CR1→CR2→CR3→CR4…CR1→CR2→CR3→CR4→CRLast→VSET→输出节点,CR2 为垂直区到水平移位寄存器的承接相。每个谱段垂直感光区上部与溢出漏 SSD 之间有一行隔离行,下部与水平寄存器之间有两行隔离行。

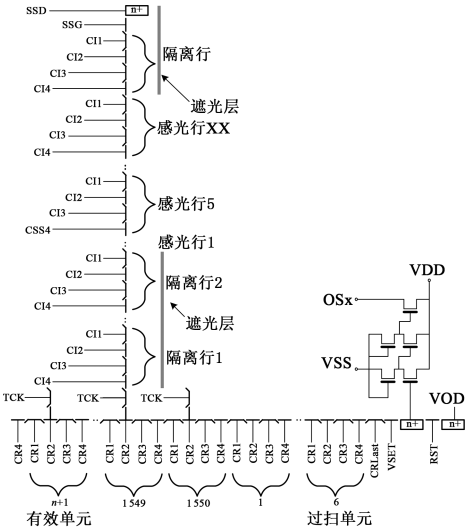


图 4 电极结构示意图

1.3　垂直感光区高帧频设计

TDICCD 垂直感光区电荷转移频率主要受多晶硅电极 *RC* 常数的影响，其中 *R* 是多晶硅电阻，*C* 是电容。CCD 阵列越大，多晶硅电极就越长，多晶硅电极的 *RC* 常数就越大，从而使得离多晶硅电极加电端距离越远的地方，受工作频率的影响就越大。

对于四谱段 TDICCD 来说，垂直区水平方向的有效像元数为 3 100 元，像元尺寸为 28 μm×28 μm，垂直区多晶硅电极长度达 28 μm×3 100＝86.8 mm。多晶硅转移栅宽度为 7 μm，电阻率为 22 Ω/□，多晶硅转移栅的电阻值为 272.8 kΩ。该器件栅介质单位面积的电容为 5.89×10^{-8} F/cm^2，则垂直区每相电极的负载电容约为 5.89×10^{-8} F/cm$^2\times7\times28\times3\,100\times10^{-8}$ cm$^2\approx353$ pF，每相多晶硅电极的 *RC* 常数最大值约为 353 pF×272.8 kΩ＝96 μs。对于 10 kHz 行频的设计，行周期为 100 μs，器件无法工作。

该器件采用在垂直感光区多晶硅电极上布铝引线来降低多晶硅转移栅的 *RC* 常数，见图 5。垂直区多晶硅电极每隔 64 列像元布一条铝引线，使得多晶硅电极 *RC* 时间常数由 96 μs 减小到 1.98，远小于 100 μs 行周期时间，可以满足器件的高行频工作要求。设计的感光区多晶硅转移栅铝引线位于器件抗弥散结构正上方，且铝引线线宽与抗弥散结构宽度相同，不影响垂直区感光像元的面积。

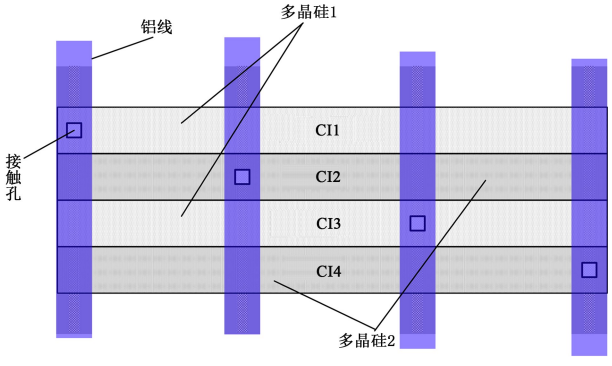


图 5　光敏区多晶硅上绑铝引线

1.4　滤光片设计

该器件采用 4 个 TDICCD 集成在同一芯片上，用滤光片光窗分光实现多谱段探测。4 个谱段对应的波长范围设计值分别为：400～450 nm(B1 谱段)、590～625 nm(B2 谱段)、705～745 nm(B3 谱段)、860～1 040 nm(B4 谱段)，带内透过率不低于 85%，带外透过率不高于 0.5%。图 6 展示了滤光片透射光谱曲线。

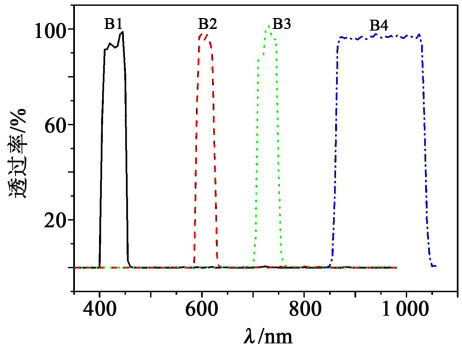


图 6　滤光片各谱段透射光谱曲线

2　器件制作

四谱段 TDICCD 采用 2 次多晶硅、2 次金属、芯片表面减反射膜等技术，涵盖氧化、离子注入、淀积、光刻、刻蚀等工艺，图 7 为四谱段 TDICCD 主要工艺流程。

栅氧化、氮化硅淀积工艺形成 CCD 复合栅介质，场氧化工艺形成有源区以外的局部氧化层。抗弥散势垒工艺形成感光像元的抗弥散结构。埋沟工艺形成器件光生电荷转移通道，溢出漏工艺形成光生过多电荷泄放通道。多晶硅工艺形成 CCD 多晶硅转移栅和放大器栅极，源漏工艺形成放大器的源和漏，接触孔和金属工艺是为了制作器件电学连接金属引线。抗弥散势垒工艺影响器件的抗弥散性能和满阱容量，对器件性能影响显著，本文从不同抗弥散势垒宽度和注入浓度开展研究。

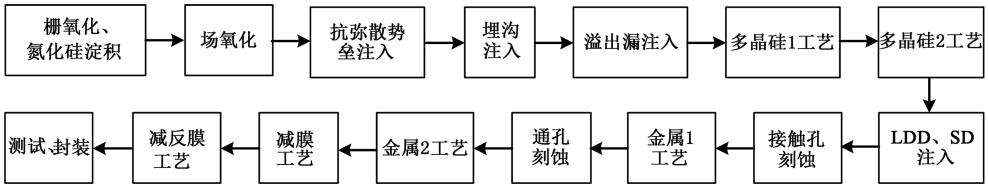


图 7　四谱段 TDICCD 主要工艺流程

图 8 展示了完成晶圆级芯片制作的四谱段 TDICCD 芯片晶圆，每个芯片包含 4 个谱段，1 个直径为 15.24 cm(6 英寸)的晶圆上分布 5 只芯片。图 9 展示了完成滤光片密封的四谱段 TDICCD 图像传感器实物照片。

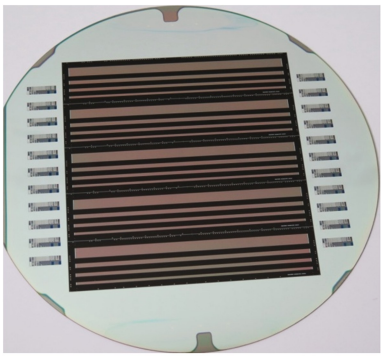


图 8 晶圆级四谱段 TDICCD 图像传感器芯片

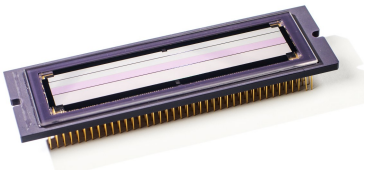
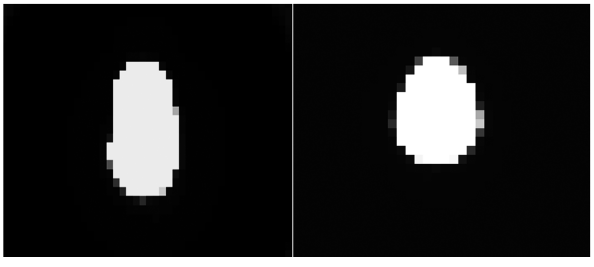


图 9 四谱段 TDICCD 器件(带滤光片)

3 器件性能参数

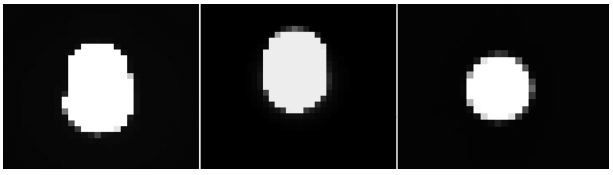
图 10 展示了不同抗弥散势垒宽度制作的器件在 100 倍光强下的小光斑成像情况,采用了同样的抗弥散势垒注入条件。由图可以看出,在相同注入条件下,抗弥散势垒宽度显著提升了器件的抗弥散能力。在某一特定注入条件下,当饱和光强增大到原来的 100 倍时,采用 1.2 μm 抗弥散势垒宽度制作的器件的小光斑成像的光斑尺寸扩展了 41.7%,而采用 0.8 μm 抗弥散势垒宽度的器件的光斑尺寸仅扩展 8.3%。在抗弥散势垒注入条件相同情况下,减小抗弥散势垒宽度可以改善器件的抗弥散能力。



(a) 抗弥散势垒宽度 0.8 μm (b) 抗弥散势垒宽度 1.2 μm

图 10 不同抗弥散势垒宽度器件在 100 倍光强下的小光斑成像

图 11 展示了相同抗弥散势垒宽度下不同注入条件的器件在 100 倍饱和光强下的小光斑成像情况,注入条件 1～注入条件 3 的注入浓度逐渐减小。由图可以看出,抗弥散势垒注入浓度减小,则器件的抗弥散能力增强。采用注入条件 1 和注入条件 2 制作的器件,在 100 倍饱和光强下成像,光斑尺寸在纵向上分别扩展了 66.7%和 44.4%,而采用注入条件 3 的器件在 100 倍光强下光斑尺寸没有扩展,其抗弥散性能好,且器件满阱容量满足要求。进一步减小抗弥散势垒注入浓度,虽然能进一步改善器件抗弥散能力,但是满阱容量达不到要求。



(a) 注入条件 1 (b) 注入条件 2 (c) 注入条件 3

图 11 不同抗弥散势垒注入条件的器件在 100 倍饱和光强下的小光斑成像

表 1 列出了研制的四谱段 TDICCD 主要性能参数,图 12 展示了器件响应光谱曲线。由表 1 可以看出,器件电荷转移效率为 0.999 99,抗弥散能力大于等于 100 倍,饱和输出幅度为 2 650 mV,满阱电子数为 500 ke^-,噪声为 70 e^-,暗电流为

表 1 四谱段 TDICCD 主要性能参数

参数名称	参数值
像元尺寸/(μm×μm)	28×28
读出速率/MHz	15
行速率/kHz	10
像元填充系数/%	92.9
抗弥散/倍	≥100
饱和输出电压/mV	2 650
满阱容量/ke^-	500
噪声/e^-	70
动态范围	7 143∶1
暗电流/(nA/cm^2@23±5 ℃)	0.7
电荷转移效率	0.999 999
像元响应非均匀性/%	1.18(全局)
平均响应度/(V/(μJ·cm^{-2}))	B1 谱段:1 323@425 nm
	B2 谱段:2 777@610 nm
	B3 谱段:3 405@720 nm
	B4 谱段:713@950 nm

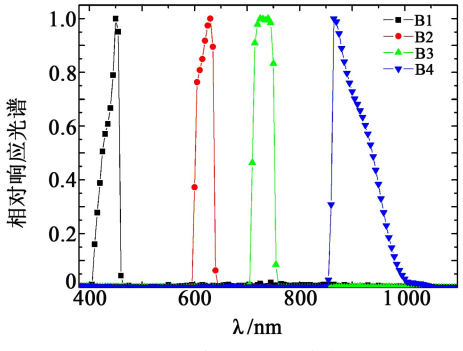


图 12 器件响应光谱曲线

0.7 nA/cm^2，动态范围为 7 143∶1，像元响应非均匀性为 1.18%。器件 B1～B4 谱段响应光谱范围分别为 400～450 nm，590～625 nm，705～745 nm 和 860～1 040 nm，平均响应度分别为 1 323，2 777，3 405 和 713 V/(μJ·cm^{-2})。

4　结论

本文研究了四谱段 TDICCD 像元、高行频等器件结构设计。通过在光窗对应位置上镀不同的窄带滤光膜来实现多谱段分光，研制了像元尺寸为 28 μm×28 μm，水平方向 3 072 个阵列规模的高响应灵敏度四谱段 TDICCD 图像传感器，行频为 10 kHz，电荷转移效率达 0.999 99，饱和输出电压为 2 650 mV，抗弥散能力大于等于 100 倍，动态范围达 7 143∶1。

参考文献：

[1] 张国瑞. 多光谱多镜头 CCD 相机的光学配准[J]. 航天返回与遥感，2001，22(1)：51-54.
Zhang Guorui. Optical registration for multi-spectral and multi-lens CCD camera[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing，2001，22(1)：51-54.

[2] 贾福娟，吴雁林，黄　颖，等. 环境减灾-1A、1B 卫星宽覆盖多光谱 TDICCD 相机技术[J]. 航天器工程，2009，18(6)：37-42.
Jia Fujuan，Wu Yanlin，Huang Ying，et al. Design and on-orbit application of CCD camera on HJ-1A/1B satellites[J]. Spacecraft Engin.，2009，18(6)：37-42.

[3] 钱浩俊，胡　雄，涂　翠，等. 星载全球大气波动成像仪研究[J]. 空间科学学报，2012，32(3)：362-367.
Qian Haojun，Hu Xiong，Tu Cui，et al. Research on space-based global atmospheric wave imager[J]. Chinese J. of Space Science，2012，32(3)：362-367.

[4] 冯　洁，廖宁放，梁敏勇，等. 用于植物病虫害诊断的多光谱成像系统[J]. 光谱学与光谱分析，2009，29(4)：1008-1012.
Feng Jie，Liao Ningfang，Liang Minyong，et al. Multispectral imaging system for the plant diseases and insect pests diagnosis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis，2009，29(4)：1008-1012.

[5] 姜　健，邹吉炜，陈茂胜，等. 多通道 TDICCD 卫星遥感相机图像噪声分析与处理[J]. 半导体光电，2022，43(2)：389-394.
Jiang Jian，Zou Jiwei，Chen Maosheng，et al. Analysis and suppression of imaging noise of multi-TDICCD remote sensing camera[J]. Semiconductor Optoelectronics，2022，43(2)：389-394.

[6] Theuwissen A J P. Solid-State Imaging with Charge-Coupled Devices[M]. New York：Kluwer Academic Publishers，2002.

作者简介：

徐道润(1977—)，男，高级工程师，主要从事光电子器件研究。