

CCD亚微伏电荷转换因子结构的设计与验证

王小东*, 汪朝敏, 李 佳, 涂 戈, 李 金

(重庆光电技术研究所, 重庆400060)

摘 要: 设计了大尺寸输出节点和大尺寸放大器栅电容的CCD特殊输出结构,使输出节点总电容约为 4.5×10^{-13} F,对设计结构进行了工艺试验。对输出节点电容进行参数校准、结构优化、流片试验、测试验证。试验结果表明,优化设计后的CCD电压转换因子精确地达到了 $0.352 \mu\text{V}/\text{e}^-$,满足了航天系统紫外线阵CCD满阱容量需达到 $1.0 \times 10^7 \text{e}^-/\text{pixel}$ 量级,饱和输出幅度在3.5~4 V范围,CCD的电压转换因子在 $0.35 \mu\text{V}/\text{e}^-$ 亚微伏水平(比传统CCD低1~2个数量级)的特殊输出结构要求。

关键词: 电荷耦合器件;电荷转换因子;输出节点电容;亚微伏结构

中图分类号: TN386.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2022)01-0028-04

Design and Experiment on Low Level Charge to Voltage Factor Structure of CCD

WANG Xiaodong, WANG Chaomin, LI Jia, TU Ge, LI Jin

(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: Larger size output node and bigger gate capacitor of amplifier were designed to ensure the total capacitor reach the level of 4.5×10^{-13} F and the experiment process of new design configuration was carried out. It was verified that after optimization of the design, the Charge to Voltage Factor of the ultraviolet linear CCD could accurately achieve $0.352 \mu\text{V}/\text{e}^-$ based on the development of parameter calibration, structure optimization, process testing, parameter examination and certifying. The results could finally meet the special needs of the space flight system on the basis of the improved CCD's performance parameters, such as high level full-well capacity up to $1.0 \times 10^7 \text{e}^-/\text{pixel}$, 3.5~4 V output voltage and $0.35 \mu\text{V}/\text{e}^-$ low level Charge to Voltage Factor with one or two order of magnitude smaller than traditional CCD.

Key words: charge-coupled device (CCD); Charge to Voltage Factor (CVF); output node capacitor; sub-micron-volt structure

收稿日期:2021-07-17

作者简介:王小东(1984—),男,硕士,高级工程师,主要从事光电探测器方面的研究;(E-mail:xiao309436932@126.com)

汪朝敏(1971—),男,高级工程师/研究员,从事光电子探测器设计;

李 佳(1984—),女,高级工程师,从事光电探测器工艺研究。

* 通讯作者

引言

线阵 CCD 由于其占空比可达 100%，在紫外响应方面有优势，同时具有高量子效率^[1-2]、低暗电流、高速输出等优点。并且，由于紫外 CCD 的特殊工作原理和特殊用途，在国防和民用中的作用越来越重要。在军事上，紫外探测器主要用于紫外告警、紫外通讯、紫外/红外复合制导等方面；在医学上，紫外 CCD 用来检测癌细胞、微生物、血液、细胞核等；紫外 CCD 在公安刑侦、纸币与证件等防伪检测方面均有很好的应用^[3-4]。

针对航天系统对太阳定标的应用需求，设计并制作了具有高紫外谱段量子效率、大满阱容量、大动态范围等特点的航天用紫外线阵 CCD。其中，CCD 的满阱容量为 $1.0 \times 10^7 e^-/\text{pixel}$ ，比传统 CCD 高 2 个数量级。由于航天系统要求紫外线阵 CCD 饱和输出幅度在 3.5~4 V 范围内，因此电荷转换因子需为 $0.35 \mu\text{V}/e^-$ 的量级水平。与传统 CCD $5 \mu\text{V}/e^- \sim 30 \mu\text{V}/e^-$ 电荷转换因子相比，低了 1~2 个数量级。根据要求，进行了亚微伏电荷转换因子 CCD 输出结构的设计开发。亚微伏量级 CCD 的输出节点结构与传统 CCD 有较大区别，需设计大尺寸的输出节点和大尺寸的放大器 MOS 管，既要保证输出节点总电容，满足亚微伏 CVF 的要求，又要保证放大器增益、频率等特性。文中采用了理论分析、设计试验、结构优化和开发验证的技术研究方案。

1 亚微伏 CVF 结构原理分析

电荷-电压转换因子 CVF^[5]表示单个电子电荷转换成电压大小的量纲，表征了 CCD 将电子电荷转换为对应电压值的能力，起决定作用的是 CCD 的输出节点的总电容。

入射光子在光敏区经过光电转换作用后，产生有效信号电子。信号电子经过 CCD 的垂直、水平转移，最后被送到水平移位寄存器的终端，即输出节点。输出节点的浮置扩散电容和源跟随放大器的栅极 MOS 电容的和即为 CCD 的输出节点总电容，该电容的值决定了 CVF 的大小^[6]。

$$CVF = q/C_s \quad (1)$$

其中， q 为电子电量； C_s 为输出节点总电容。

$$C_s = C_{\text{MOS}} + C_{\text{FD}} \quad (2)$$

其中， C_{MOS} 为输出节点 MOS 电容； C_{FD} 为输出节点浮置扩散电容。

$$C_{\text{MOS}} = C_G + C_{\text{GS}} + C_{\text{GD}} + C_F \quad (3)$$

C_G 为第一级放大器栅电容； C_{GS} 为第一级放大器栅源电容； C_{GD} 为第一级放大器栅漏电容； C_F 为场区引线电容。

$$C_{\text{FD}} = C_{\text{OTG}} + C_R + C_{\text{DEP}} + C_{\text{SIDE}} + C_{\text{TAP}} \quad (4)$$

C_{OTG} 为输出栅边缘电容； C_R 为复位栅边缘电容； C_{DEP} 为浮置扩散区下电容； C_{SIDE} 为浮置扩散区边缘与衬底间电容。

根据理论计算，要得到 $0.35 \mu\text{V}/e^-$ 量级水平的 CVF 数值，则要保证设计的输出节点总电容 C_s 约为 $4.5 \times 10^{-13} \text{ F}$ ，比传统的 CCD 大 1~2 个数量级。因此，输出节点的结构与传统 CCD 有较大区别，设计时需要综合考虑输出节点浮置扩散电容和放大器 MOS 管的栅电容的比例，以匹配输出节点总电容。

2 试验

工艺制作中，理论的工艺设计和实际工艺实施之间，会存在一定的工艺偏差和非理想因素偏差，该偏差最终致使 CVF 的理论设计值与工艺制作的实际值之间存在差异，这个差异称为非理想偏差因子。为验证非理想偏差因子的大小，并将初次试验结果作为下一次设计优化的定量参考，制定了两步试验方案：第一次为摸底性试验设计，设置多个 CVF 值的 CCD 输出结构，将实际值与理论值做比较，找到工艺偏差因子及下一步优化改进的方向；第二次为验证性的正式设计，根据得到的偏差因子，在验证性设计中做针对性的设计校准，验证偏差因子的校准情况，最终得到满足设计预期的 CCD 输出结构。

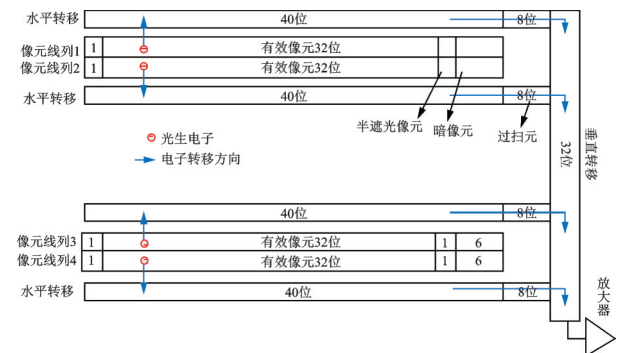


图1 用于工艺试验的紫外线阵 CCD 结构

Fig.1 Ultraviolet linear CCD structure for process experiment

2.1 第一次设计试验

通过 1 中的理论分析，对影响 CVF 的各个因素

进行了理论计算。计算结果表明,对 CVF 贡献最大的两个部分为 MOS 电容中的第一级放大器电容 C_G 和输出节点浮置扩散电容中的 C_{DEP} 。根据制定的试验方案,一次性设计了 5 种输出节点结构,分别对应 5 个不同的 CVF 值,分别为 $0.25 \mu V/e^-$ 、 $0.30 \mu V/e^-$ 、 $0.35 \mu V/e^-$ 、 $0.40 \mu V/e^-$ 、 $0.45 \mu V/e^-$ 。其中,为了避免过多变量因素的干扰,设计不同 CVF 值时,保持输出节点 FD 电容面积、输出栅长、复位栅长为定值,只将第一级 MOS 管的宽长比作为变量,5 种输出节点结构设计值如表 1 所示。与传统 CCD 的输出结构相比,FD 和第一级 MOS 放大器的尺寸均放大。

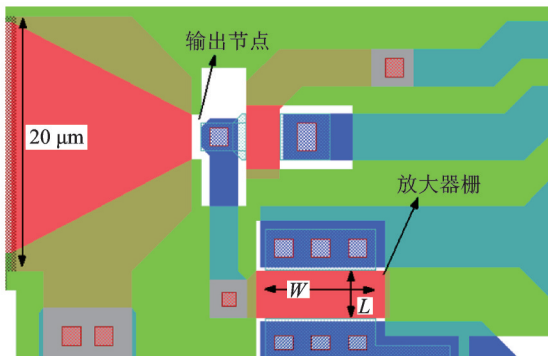
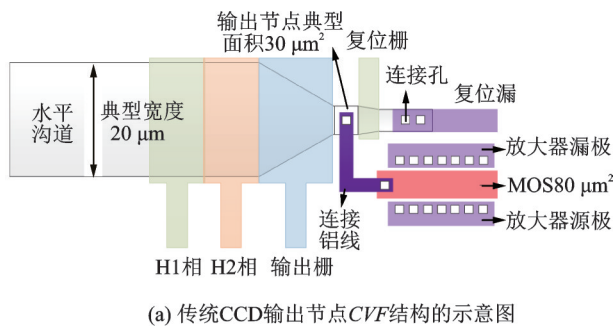


图 2 传统 CCD 输出节点的 CVF 结构

Fig.2 Traditional output node CVF structure of CCD

将这些具有不同 CVF 输出结构的 CCD 在同一工艺批次中流片验证。每种 CVF 值选取 5~10 个对应的 CCD 器件,分别测试出每组芯片的 CVF 值然后求平均,取该平均值为该种结构的实际 CVF 值,与不同 CVF 值进行对比分析。传统 CCD 输出节点的

CVF 结构见图 2,设计试验的输出结构见图 3。

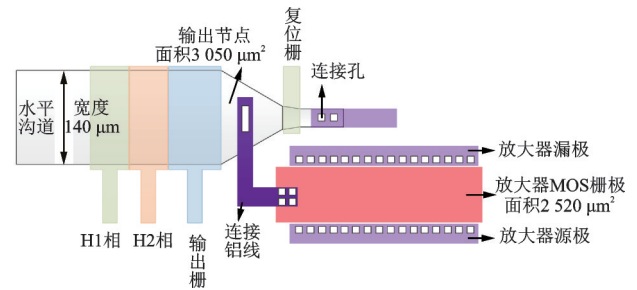


图 3 第一次设计试验中的 CVF 结构

Fig.3 CVF structure of first design experiment

设计试验中的输出节点 FD 区面积为 $1480 \mu m^2$,传统 CCD 的 FD 区面积为 $30 \mu m^2$;设计试验中的 MOS 管栅面积为 $2520 \mu m^2$,传统 CCD 的 MOS 管栅面积为 $80 \mu m^2$ 。由图 2、图 3 对比可知,设计试验中 CCD 的输出结构和尺寸与传统 CCD 相比,均有较大差别。

设计试验 CCD 的理论设计值和实际测试值对比如表 1 所示。

由表 1 的设计测试对比可知,5 种 CVF 结构的实际测试值均比理论值偏大,且均大于希望值 $0.35 \mu V/e^-$ 。从第一次试验设计可以得出以下结论:①综合工艺误差在内,本次试验设计的 5 种 CVF 输出结构比预期值均偏大;②反推到输出节点的总电容,设计值比理论预期值均偏小;③根据 5 种不同设计的整体偏差情况,可归纳出综合所有非理想因素,导致理论值和实际值偏差程度的非理想偏差因子。根据偏差因子做设计的优化校准。

2.2 优化设计试验

综合工艺误差在内,根据第一次试验中理论设计值和实际值的对比,以及归纳出的非理想偏差因子,进行第二次的优化设计和偏差校正。

第二次优化设计时,仍可能存在因设计误差而造成实际值与理论预期不匹配。为避免由于变量过多导致问题不容易定位,因此,针对性的制定了优化修改的方案:①输出栅长和复位栅长参数固定

表 1 第一次试验设计值和实测值

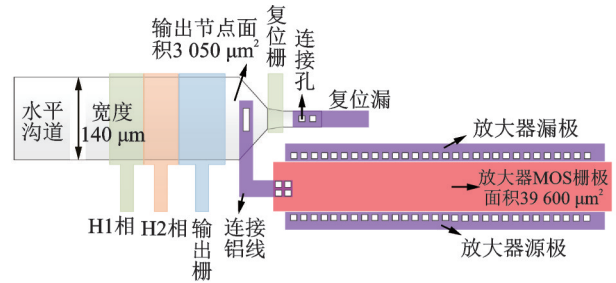
Tab.1 Designed and examined parameters of first design experiment

第一级放大器 MOS管宽度/ μm	第一级放大器 MOS管长度/ μm	输出节点 FD 电容面 积/ μm^2	输出栅长/ μm	复位栅长/ μm	理论设计的 CVF 值/ ($\mu V/e^-$)	实际测试的 CVF 值/ ($\mu V/e^-$)
140	18	1480	120	15	0.25	0.48
90	14	1480	120	15	0.30	0.55
80	10	1480	120	15	0.35	0.63
70	8	1480	120	15	0.4	0.71
60	7	1480	120	15	0.45	0.81

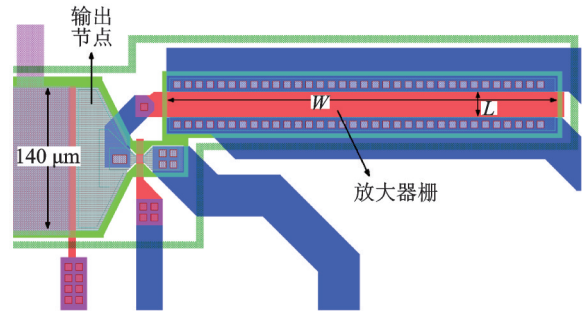
不变;②第一级放大器MOS沟道长度 L 不变,只将栅宽 W 作为MOS电容调整的变量;③按计算的偏差比例因子,调整输出节点FD电容的面积和第一级放大器MOS管的宽度;④本次设计4种输出结构分别对应不同的 CVF 值。

CCD输出节点的优化结构见图4,按偏差比例因子扩大了输出节点浮置扩散区FD的面积和放大管MOS的宽长比。FD区扩大后电容的增加量和MOS宽长比扩大后电容的增加量,在输出节点总电容中的占比与第一次设计试验时不一致,归纳其原因为:放大管MOS的电容占输出节点总电容的比例较高,大于80%,且在小 CVF 中的贡献率较大。按同样比例增加浮置扩散区FD的电容和放大器的MOS电容后,它们在输出节点总电容的比例差异更大。

根据理论分析和计算值设计浮置扩散区FD的面积和放大器的MOS管参数,按设计参数绘制优化后的CCD输出结构示意图,如图4(a),优化设计的版图结构如图4(b)所示。各部分参数的理论设计值和实际测试值对比见表2。



(a) 优化后的CCD输出结构示意图



(b) 优化设计的版图结构

图4 优化的 CVF 结构

Fig.4 CVF structure after optimization

表2 第二次试验设计值和实测值

Tab.2 Designed and examined parameters of optimized structure

偏差比例因子	输出节点FD电容面积/ μm^2	第一级放大器MOS管宽度/ μm	第一级放大器MOS管长度/ μm	FD电容和MOS电容对总电容贡献占比	理论设计的 $CVF/(\mu\text{V}/\text{e}^-)$	实际测试的 $CVF/(\mu\text{V}/\text{e}^-)$
0.92	3 050	290	18	0.062:0.938	0.25	0.266
0.83	3 050	260	18	0.070:0.930	0.30	0.314
0.80	3 050	220	18	0.079:0.921	0.35	0.352
0.78	3 050	190	18	0.091:0.909	0.40	0.413

由表2可知,综合考虑工艺偏差和设计偏差的因素,按偏差比例因子设计校正的第二次试验比较符合预期设计值,得到了 $0.352 \mu\text{V}/\text{e}^-$ 的电荷-电压转换因子。

3 结 论

由于工艺制作过程中存在工艺偏差等非理想因素,会导致 CVF 理论设计值和实际值之间存在偏差。为了得到 $0.35 \mu\text{V}/\text{e}^-$ 量级的电荷-电压转换因子,制定开展两次设计试验的方案,第一次通过试验找出非理想偏差因子,第二次根据偏差因子进行校准的优化设计。

第一次的设计试验,一次性设计了5种 CVF 的CCD结构,通过试验归纳,总结了综合所有非理想因素在内的非理想偏差因子,作为下一次设计验证

的优化参考。第二次根据非理想偏差因子设计验证,制定了4种 CVF 的CCD设计校准结构。通过测试验证,最终获得了符合预期设计值的 CVF 。

参 考 文 献

- [1] 浦昭邦,赵 辉.普通高等教育测控信息技术规划教材光电测试技术[M].北京:机械工业出版社,2005:45.
- [2] 曾光宇,张志伟,张存林.光电检测技术[M].北京:清华大学出版社,2009:87.
- [3] 王以铭.电荷耦合器件原理与应用[M].北京:科学出版社,1987:8-14.
- [4] 孙亚英.线阵CCD在工业检测中的应用[J].电子技术与软件工程,2014,16:1-2.
- [5] Dunford Alice, Stefanov Konstantin, Holland Andrew. Low voltage electron multiplying CCD in a CMOS process[J].UK: High Energy Optical and Infrared Detectors for Astronomy, SPIE, 2016,9915:2-3.
- [6] Janesick James R. Scientific charge-coupled devices[M]. Washington: SPIE Press Bellingham, 2001:509-516.