光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021121802

CCD图像传感器输出节点电荷容量设计

李　立*

（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 从电荷耦合器件(CCD)的满阱电荷容量和片上放大器的工作电压范围两个方面对器件的节点电荷容量进行了设计，并推导出输出节点电荷容量设计的优化公式。从公式中可以看出，输出节点的电荷容量设计除了需要满足CCD信号电荷转移本身所需的容量值以外，还必须保证节点处的电压变化范围在输出放大器线性工作区域内，才能使信号电荷能够完整线性地被放大器输出，从而保证CCD器件整体的非线性和满阱容量性能。因此，输出节点电荷容量的设计除了需要考虑节点自身的电容外，还应综合考虑输出放大器相关MOS管的宽长比、阈值电压、工作电压等因素。

关键词： 电荷耦合器件；输出节点；电荷容量

中图分类号： TN386.5　**文章编号：** 1001－5868(2022)04－0777－04

Design for Charge Handling Capacity of Sense Node in CCDs

LI Li

(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: In this paper, the handling capacity of sense node was designed based on CCD's full well charge capacity and the work voltage range of the on-chip amplifier, and the expressions for the optimizing design of the handling capacity of sense node was deduced. As can be seen from the expressions, besides matching the transferring of the full well charge for the CCD, the voltage change range of sense node inducted by the signal charge also must be in the linear region of the on-chip amplifier so that the CCD's output nonlinearity and full well charge capacity will not be affected. Therefore, the CCD designers must consider not only the sense node's capacitance, but also the MOSFET's wide-length ratio, threshold voltage, work voltage etc. of the on-chip amplifier during the design of charge handling capacity of sense node.

Key words: CCD; charge handling capacity; sense node

0　引言

电荷耦合器件(Charge-Coupled Devices，CCD)是一种将可见光强度信号在器件阵列像元中转换为与光强对应的电子电荷信号，并通过电荷耦合方式将各像元电荷信号顺序传输到输出端，经片上输出放大器将电荷信号转换为电压信号输出的阵列传感器。传感器像元阵列输出的电压信号经过外加的驱动与图像信号处理电路可复现为与阵列规模对应的图像信息[1-2]。由于传输转移的是信号电荷，器件具有噪声小、动态大等系列优势[3-5]，因此CCD的电荷容量成为影响其性能参数的关键指标之一[6]。

CCD的电荷容量主要受到像元电荷容量、水平移位寄存器电荷容量以及输出节点电荷容量三部分的影响。像元电荷容量及水平移位寄存器电荷容量会直接反映器件的满阱容量性能，往往受到人们的重点关注和研究[7-10]，而输出节点的电荷容量并不能直接反映器件的满阱容量性能，通常在器件设计时被忽视，从而对器件的性能产生制约。本文通过对CCD输出放大器工作状态的分析，提出了CCD

收稿日期：2021－12－18.

*通信作者：李　立　　E-mail：lili337@sohu.com

输出节点电荷容量的设计方法。

1 CCD电荷容量的基本原理

CCD一般由像元阵列、水平移位寄存器和输出放大器组成，每部分都会有各自的电荷容量要求，由于CCD信号电荷的转移顺序为像元阵列-水平移位寄存器-输出节点，为了保证电荷能够完整转移到下一部分，一般要求越到后面的部分，电荷容量越大，即CCD的电荷容量要求依次为：输出节点，水平移位寄存器，像元阵列。因此，对于位于电荷转移最末端的输出节点来说，其对电荷容量的要求是最大的。

CCD输出节点的电荷容量主要由节点的电容及工作电压变化决定，可表示为[11]

$$Q = C \cdot \Delta V \tag{1}$$

其中，Q 为电荷容量，C 为节点电容，ΔV 为器件工作时输出节点电压变化。

2 CCD输出节点电荷容量设计

与像元阵列和水平移位寄存器的相对独立的电荷容量设计不同，由于CCD的输出节点直接与输出放大器相连，信号电荷在输出节点处通过节点电容转换为电压，并由片上放大器将电压输出[12]。输出节点的电荷容量大小会直接影响信号电荷转换出的电压大小，进而影响片上放大器的工作状态。电荷容量设计得过小，会导致输出节点无法完全接收来自像元的信号电荷；若电荷容量设计得过大，则信号电荷转移到输出节点时所产生的电压差会超过放大器线性工作范围，从而导致器件的饱和输出电压、非线性等性能下降[13]，因此CCD输出节点电荷容量设计除了需要考虑到信号电荷转移的要求外，还必须满足放大器正常工作的电压范围。

2.1 输出级无内部负载的放大器

输出级无负载的CCD片上放大器结构如图1所示。

CCD的放大器一般为二级源跟随器，其中M0为复位管，V_{RD} 为复位管漏电压，V_{RG} 为复位脉冲电压；M1～M3构成两级源跟随器，M1为第一级放大管，M2为第一级负载管，M3为第二级放大管，V_{DD} 为放大器漏电压。

放大器正常工作时，所有MOS管均需处于饱和区，其电流可表示为[14]

$$I_{DS} = \frac{W}{2L}\mu_{Si}C_{ox}(V_{AEFF} + V_{GS})^2 \tag{2}$$

其中，I_{DS} 为MOS管的漏电流，W 为沟道宽度，L 为沟道长度，μ_{Si} 为迁移率，C_{ox} 为MOS管栅电容，V_{AEFF} 为MOS管的沟道有效阈值电压。

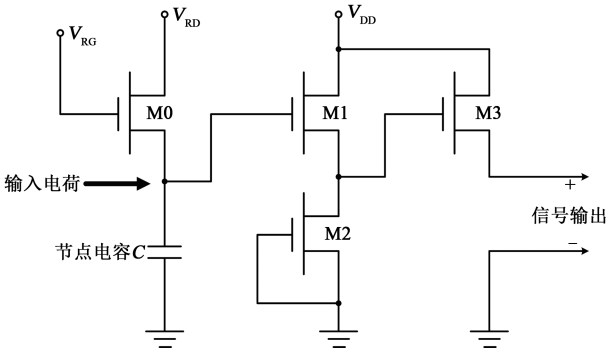


图1 CCD片上放大器输出级无内部负载结构原理图

设 $\mu_{Si}C_{ox} = K$，则有

$$I_{DS} = \frac{W}{2L}K(V_{AEFF} + V_{GS})^2 \tag{3}$$

由于流过M1与M2的电流相等，则有

$$\frac{W_1}{2L_1}K_1(V_{AEFF1} + V_{GS1})^2 = \frac{W_2}{2L_2}K_2(V_{AEFF2} + V_{GS2})^2 \tag{4}$$

由于M2的栅源共地，即 $V_{GS2} = 0$，则上式可简化为

$$\frac{W_1}{2L_1}K_1(V_{AEFF1} + V_{GS1})^2 = \frac{W_2}{2L_2}K_2V_{AEFF2}^2 \tag{5}$$

则有

$$V_{GS1} = \sqrt{\frac{W_2L_1K_2}{W_1L_2K_1}} \cdot V_{AEFF2} - V_{AEFF1} \tag{6}$$

要保证M2工作在饱和区，则有

$$V_{GD2} \leqslant -V_{AEFF2} \tag{7}$$

即有

$$V_{G2} - V_{D2} \leqslant -V_{AEFF2} \tag{8}$$

由于 $V_{G2} = 0$，则

$$V_{D2} \geqslant V_{AEFF2} \tag{9}$$

即要保证M2处于饱和区，其漏端的电压最小值应为其沟道有效阈值电压。

由此可以得到MOS管M1源端电压 V_{S1} 的最小值为 V_{AEFF2}，即

$$V_{S1min} = V_{D2min} = V_{AEFF2} \tag{10}$$

则M1栅极电压的最小值为

$$V_{G1min} = V_{S1min} + V_{GS1} \tag{11}$$

将式(6)代入式(11)可得

$$V_{G1min} = V_{AEFF2} + \sqrt{\frac{W_2L_1K_2}{W_1L_2K_1}} \cdot V_{AEFF2} - V_{AEFF1} \tag{12}$$

由上式可得到输出节点(即 M1 的栅极)的电压最小值。

$$V_{\min}=V_{G1\min}=\left(1+\sqrt{\frac{W_2L_1K_2}{W_1L_2K_1}}\right)V_{AEFF2}-V_{AEFF1} \tag{13}$$

按照 CCD 的工作原理,输出节点的电压最大值即为输出直流电平的电压值,如图 2 所示。

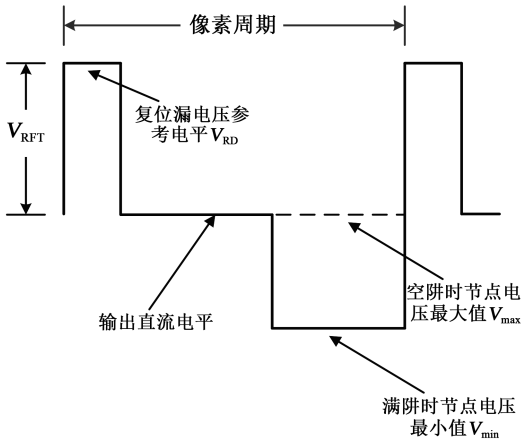


图 2　CCD 输出信号波形图

则输出节点电压的最大值即为输出直流电平,可表示为

$$V_{\max}=V_{RD}-V_{RFT} \tag{14}$$

V_{RFT} 为复位漏电压参考电平高度,可表示为

$$V_{RFT}=\frac{C_{GS}}{C_S+C_{GS}}V_{PC} \tag{15}$$

将式(15)代入式(14)可得

$$V_{\max}=V_{RD}-\frac{C_{GS}}{C_S+C_{GS}}V_{PC} \tag{16}$$

其中,V_{RD} 为复位漏电压,C_{GS} 为复位管栅源电容,C_S 为节点电容,V_{PC} 为复位脉冲幅度。

由式(13)和式(16)可得输出节点的电压变化范围为

$$\Delta V=V_{G1\max}-V_{G1\min}$$

$$\Delta V=V_{RD}-\frac{C_{GS}}{C_S+C_{GS}}V_{PC}-\left(1+\sqrt{\frac{W_2L_1K_2}{W_1L_2K_1}}\right)\cdot V_{AEFF2}+V_{AEFF1} \tag{17}$$

由式(17)可以看出,若要保证 CCD 的放大器在线性区正常工作,节点的电压变化范围 ΔV 就不能超过式(17)中所设计的值,否则就会超出放大器正常的工作电压范围,导致放大器无法将整个信号电荷线性输出,从而影响 CCD 的饱和输出电压、非线性等性能。

由式(17)可得输出节点的电荷容量的最大值为

$$Q=C_s\Delta V=C_s\left[V_{RD}-\frac{C_{GS}}{C_S+C_{GS}}V_{PC}-\left(1+\sqrt{\frac{W_2L_1K_2}{W_1L_2K_1}}\right)V_{AEFF2}+V_{AEFF1}\right] \tag{18}$$

而输出节点的电荷容量最小值应该不低于水平移位寄存器的电荷容量。

由此可得,输出节点的电荷容量设计值应该介于水平移位寄存器的电荷容量和式(18)所计算得到的电荷容量值之间,才能保证输出节点的电荷容量既能完全承接来自水平移位寄存器的信号电荷,又能工作在输出放大器最佳的电压范围内。由式(18)可知,输出节点的电荷容量与节点电容、放大器 MOS 管宽长比和阈值、复位电压等相关,在设计时应综合考虑以上因素才能保证最佳的输出节点电荷容量。

2.2　输出级有内部负载的放大器

输出级有负载的 CCD 片上放大器结构如图 3 所示。

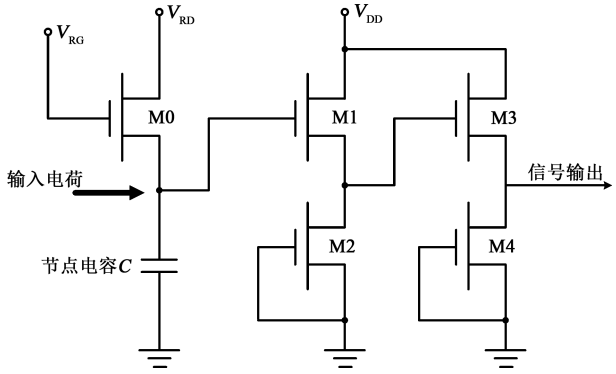


图 3　输出级有负载的 CCD 片上放大器结构原理图

有内部负载时,需要同时考虑 M2 和 M4,要满足两个 MOS 管同时工作在饱和区,从 M4 开始推导,由式(12)可得

$$V_{G1\min}=V_{S3\min}+V_{GS3}+V_{GS1} \tag{19}$$

由式(10)可得

$$V_{S3\min}=V_{D4\min}=V_{AEFF4} \tag{20}$$

由式(6)可得

$$V_{GS3}=\sqrt{\frac{W_4L_3K_4}{W_3L_4K_3}}\cdot V_{AEFF4}-V_{AEFF3} \tag{21}$$

则将式(6)、(20)和(21)代入式(19)可得

$$V_{G1\min}=V_{AEFF4}+\sqrt{\frac{W_4L_3K_4}{W_3L_4K_3}}\cdot V_{AEFF4}-V_{AEFF3}+\sqrt{\frac{W_2L_1K_2}{W_1L_4K_1}}\cdot V_{AEFF2}-V_{AEFF1} \tag{22}$$

输出节点最大电压值的推导与第一部分相同,

由式(18)可得输出节点的电荷容量最大值为

$$Q = C_s \Delta V = C_s \left[V_{RD} - \frac{C_{GS}}{C_S + C_{GS}} V_{PC} - V_{AEFF4} - \sqrt{\frac{W_4 L_3 K_4}{W_3 L_4 K_3}} \cdot V_{AEFF4} + V_{AEFF3} - \sqrt{\frac{W_2 L_1 K_2}{W_1 L_4 K_1}} \cdot V_{AEFF2} + V_{AEFF1} \right] \quad (23)$$

以上推导是基于CCD最常用的两级源跟随放大器进行的,该推导方法同样可扩展到单级或三级源跟随放大器。

3 总结

本文对CCD输出节点电荷容量的原理及影响因素进行了分析,提出了从放大器工作电压范围及器件自身的电荷容量要求两方面对输出节点的电荷容量进行设计的方法。在保证CCD放大器中各个MOS管处于最佳工作状态的基础上,推导出器件输出节点的电荷容量设计公式,从公式中可以看出,CCD输出节点电荷容量的设计除了与节点自身的电容相关外,还应考虑到信号电荷在输出节点所产生的电压变化的范围是否超过放大器的正常工作电压范围,而电压变化范围可以通过放大器MOS管的宽长比、阈值电压、工作电压等优化设计进行调整,以匹配器件本身对输出节点电荷容量的要求。

参考文献:

[1] 胡 琳. CCD图像传感器的现状及未来发展[J]. 电子科技, 2010, 23(6): 82-85.
Hu Lin. Current situations and future developments of CCD image sensors[J]. Electronic Sci. & Tech., 2010, 23(6): 82-85.

[2] 姜忠宝, 高俊国, 段少丽, 等. CCD图像传感器的原理及军事应用[J]. 电子元器件应用, 2003, 5(1): 16-18.
Jiang Zhongbao, Gao Junguo, Duan Shaoli, et al. Principle and military application of CCD image sensor [J]. Electronic Component & Device Applications, 2003, 5(1): 16-18.

[3] 熊 平. CCD与CMOS图像传感器特点比较[J]. 半导体光电, 2004, 25(1): 1-4.
Xiong Ping. Comparison of CCD and CMOS image sensors[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2004, 25(1): 1-4.

[4] 张 坤. 国外星用CCD图像传感器的研制现状[J]. 中国电子科学研究院学报, 2007, 2(3): 324-328.
Zhang Kun. Abroad development status of CCD image sensors used in secondary planet [J]. J. of China Academy of Electronics and Information Technology, 2007, 2(3): 324-328.

[5] 张展霞, 刘洪涛, 何家耀. 电荷耦合器件及其应用进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2000, 20(2): 160-166.
Zhang Zhanxia, Liu Hongtao, He Jiayao. Progress in charge-coupled device and its application[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2000, 20(2): 160-166.

[6] Shin'ichi Kawai, Nobuhiko Mutoh, Nobukazu Teranishi. Thermionic-emission-based barrier height analysis for precise estimation of charge handling capacity in CCD registers[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 1997, 44(10): 1588-1592.

[7] 张 坤, 李仁豪. 埋沟CCD器件工作状态的设计[J]. 半导体光电, 2000, 21(增刊): 49-52.
Zhang Kun, Li Renhao. Design of operation mode of buried channel CCD[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2000, 21 (Supplement): 49-52.

[8] Esser L J M. Charge-coupled device: Physics, technology and applications[J]. Proc. of Inter. Work-shop on Physics of Semiconductor Dvices, New Delhi, 1980(23/28): 235-249.

[9] 熊 平, 陈红兵. 埋沟CCD器件电荷处理容量的二维数值模拟[J]. 半导体光电, 2000, 21(增刊): 36-41.
Xiong Ping, Chen Hongbing. 2-D numerical simulation of charge handling capacity in buried-channel CCDs [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2000, 21 (Supplement): 36-41.

[10] Pallab K. Chatterjee A L F, Tasch J R, et al. Enhanced capacity CCD[J]. IEEE Trans. on Electron Device, 1978, 25 (2): 1374-1382.

[11] Theuwissen A J P. Solid-State Imaging with Charge-Coupled Devices[M]. Kluwer Academic Publishers, 1995: 76-79.

[12] Sangsik Park, Hyungsoo Uh, Seokrim Choi. A high-sensitivity CCD image sensor using source follower circuit with actively controlled gain characteristics[J]. Sensors and Actuators, 2002, A(101): 10-13.

[13] 张 坤. CCD片上放大器的设计与仿真[J]. 半导体光电, 2005, 26(增刊): 4-8.
Zhang Kun. Design and simulation of CCD on-chip amplifier [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2005, 26 (Supplement): 4-8.

[14] Janesick J R. Scientific Charge-Coupled Devices [M]. Bellingham, WA: SPIE Press, 2001.

作者简介:

李 立(1981—),男,重庆市人,硕士,主要从事CCD器件设计及仿真技术研究。