

埋沟电荷耦合器件最佳工作点及最大电荷处理量的计算

汪朝敏 李平 郑渝 李立

(中国电子科技集团公司第 44 研究所, 重庆 400060)

摘要 对埋沟电荷耦合器件(CCD)的势阱形成机理进行了描述。基于泊松方程求解,通过计算埋沟 CCD 信号电子进入势阱后填充的耗尽区大小,得出了埋沟 CCD 电荷处理量的计算公式,同时得出了埋沟 CCD 所需的最佳驱动脉冲。分析计算了埋沟结深、衬底掺杂等对 CCD 最佳工作点及最大电荷处理量的影响。根据理论计算,设计制作的 6000 元线阵 CCD 信号处理量达到了 $4643 \text{ e}/\mu\text{m}^2$ 。

关键词 光电子学; CCD; 电荷处理量; 工作点; 图像传感器

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200929s1.0386

Calculation of Optimum Operating Point and Maximum Charge Capacity of Buried Channel Charge Coupled Device

Wang Chaomin Li Ping Zheng Yu Li Li

(China Electronics Technology Group Corporation No.44 Research Institute, Chongqing 400060, China)

Abstract The mechanics of the potential well of buried channel charge coupled device (CCD) are described. By solving Poisson's differential equations, a brief calculation of the optimum operating point and maximum charge capacity has been given. The effect factors such as the buried channel junction depth and substrate doping concentration on the CCD's optimum operating point and maximum charge capacity are analysed. According to the theoretical calculation, the charge capacity of the 6000 pixel linear CCD designed by our group is $4643 \text{ e}/\mu\text{m}^2$.

Key words optoelectronics; CCD; charge capacity; operating point; image sensor

1 引 言

1969 年 10 月 19 日,美国贝尔电话实验室的 Willard S. Boyle 和 George E. Smith 发明了电荷耦合器件(CCD)^[1]。随后,发现其具有直接光电转换、低噪声、体积小、功耗低、高的光响应一致性、高动态范围等优点。

得益于图像获取的需求及微电子技术的推动,30 多年来 CCD 获得了巨大的发展,已报道了像素尺寸为 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ 的 $7168 \text{ pixel} \times 8192 \text{ pixel}$ 和 $8.75 \mu\text{m} \times 8.75 \mu\text{m}$ 的 $9216 \text{ pixel} \times 9216 \text{ pixel}$ CCD^[2,3]。长线阵 CCD 的发展水平为像素点间距 $5 \mu\text{m}$ 时可达 12000 pixel ^[4]。

CCD 的电荷处理量及工作点的计算,是 CCD 设计的基本内容之一。传统的计算方法^[1]采用耗尽

二极管电容模型,由于耗尽二极管电容的大小随充电而变,而计算时按不变处理,由此带来了误差。本文提出了一种更准确的计算方法,思路为:CCD 的信号电子进入势阱时,填充耗尽区,计算填充的耗尽区的大小,即可算得 CCD 的电荷处理量,同时得到了 CCD 的最佳工作点。CCD 工作点的计算,考虑到了 CCD 势阱被填充时表面势的变化。

2 埋沟 CCD 结构及工作原理简述

埋沟 CCD 结构如图 1 所示,驱动脉冲波形如图 2 所示。 Φ_1, Φ_2, Φ_3 是 CCD 时钟栅, ID 是输入二极管, IG 是输入栅, OG 是输出栅, OD 是输出二极管。

埋沟 CCD 工作时埋沟区域并非一直处于耗尽状态,当信号电子进入 CCD 势阱时,势阱里的耗尽

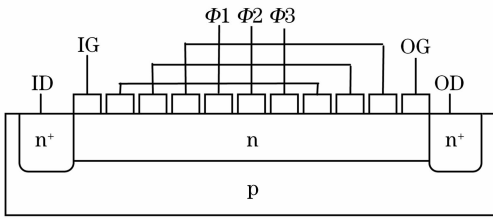


图 1 埋沟 CCD 结构示意图

Fig. 1 Buried channel CCD structure

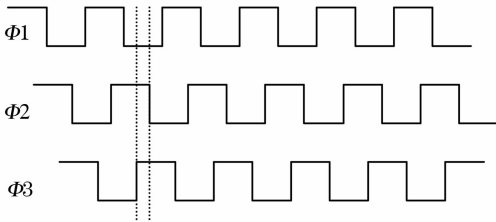


图 2 驱动脉冲波形示意图

Fig. 2 Line timing diagram

区将被填充,当信号电子被驱动脉冲赶走,埋沟区域又进入耗尽状态。

因此,对埋沟区域的耗尽,可以这样理解:当驱动脉冲加在 CCD 时钟电极上时,在埋沟区形成移动的势阱,埋沟区域的电子被赶走(最后通过复位漏抽走),埋沟区域进入耗尽状态,为接收信号电子作好了准备,形成的势阱如图 3 所示。信号电子的注入方式通常有光注入及电注入。

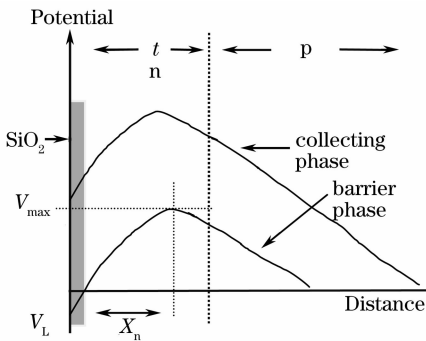


图 3 空阱时埋沟 CCD 势阱图

Fig. 3 Buried channel empty potential well

3 埋沟 CCD 工作点及最大电荷处理量的计算

在空阱时,当 CCD 时钟栅上的电压从高电位下降到低电位时,表面势(栅介质与硅的界面电势)随着下降,当电位为 V_L (参见图 3)时,表面势刚好为零。此时势垒相的电位如进一步降低,由于 P 型沟阻区的存在,表面将出现空穴积累,表面势不会再下降,被钳在零电位。因此,驱动脉冲的最佳低电位为

V_L 。栅压为 V_L 时净电荷如图 4 所示,硅体内的正、负电荷分别为电离了的施主杂质及得到电子的受主杂质,“A 区”内正负电荷相等,“B 区”内正负电荷也相等,“A 区”与“B 区”的分界处的电位为 V_{max} , V_{max} 处电场为零。

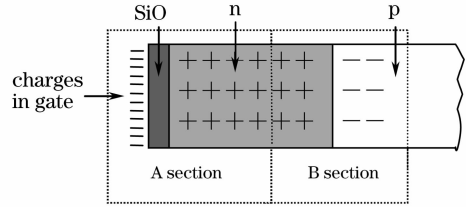


图 4 栅压为 V_L 时净电荷示意图

Fig. 4 Net charge diagrams for a fixed gate voltage V_L

求解栅压为 V_L 时(参见图 3), V_{max} 处左右两边的泊松方程,得到

$$\begin{cases} V_{max} = \frac{qN_D x_n^2}{2\epsilon_{Si}}, & (1) \\ V_{max} = \frac{qN_D (t - x_n)^2}{2\epsilon_{Si}} \left(1 + \frac{N_D}{N_A}\right), & (2) \end{cases}$$

V_{max} 为势垒相下埋沟区的电势最大值, q 为电子电量, N_D 为埋沟掺杂浓度(采用均匀掺杂近似), X_n 为电势最大值处距硅表面的距离, ϵ_{Si} 为硅的介电常数, N_A 为衬底掺杂浓度。

求解(1)式、(2)式构成的方程组,得 V_{max} 及 X_n 。

已知 V_{max} 及 X_n 后,利用栅介质电容与 V_{max} 处左边耗尽电容串联的关系,可得出求解 V_L 的公式如下:

$$V_L = -\frac{qN_D x_n}{\epsilon_{SiO_2}/d}, \quad (3)$$

ϵ_{SiO_2} 为二氧化硅的介电常数, d 为栅介质二氧化硅的厚度。

当 CCD 表面满阱(电荷达到硅与二氧化硅界面)与溢出满阱(电荷由势阱相下溢出到势垒相下)同时发生时,电势分布如图 5 所示,净电荷分布如

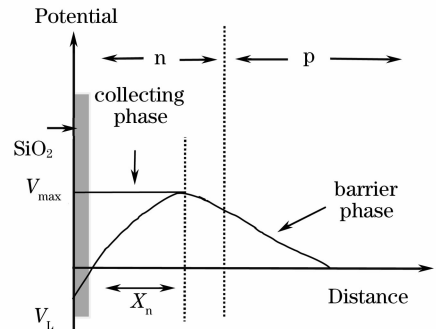


图 5 满阱时 CCD 势阱图

Fig. 5 Buried channel full potential well

图 6 所示。满阱时由于势阱相下从界面到 X_n 处的耗尽区已经被填充,该区域的电势处处相等, X_n 处右边的电势分布与势垒相下的相同。因此势阱相所需加的最佳栅压为 V_{max} (忽略了平带电压)。图 6 中,“A 区”为中性区,“B 区”内正负电荷相等。

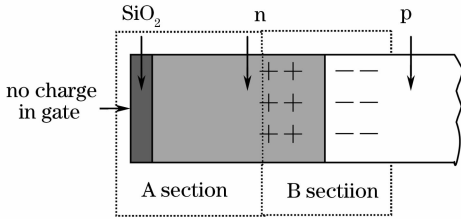


图 6 满阱时势阱相下净电荷示意图

Fig. 6 Net charge diagrams under collecting phase at full potential well



图 7 6000 元线阵 CCD 扫描成像效果图

Fig. 7 A CCD scanning image using the 6000 pixel linear CCD

给 CCD 加上理论算出的驱动脉冲,测得 CCD 的实际信号处理量为 $4643 \text{ e}/\mu\text{m}^2$ 。实际结果比理论计算结果小,原因在于 CCD 势阱里的信号电子在未填充到二氧化硅与硅界面时就可以通过热电子发射与界面态交换电子,成为实际上的表面满阱;同时,随着信号电子注入 CCD 势阱,势阱逐渐变浅,电荷将会通过热电子发射进入势垒相下以至相邻势阱。

5 结 论

由于(1)式、(2)式、(4)式均跟栅介质厚度无关,所以 CCD 的最大电荷处理量跟栅介质厚度无关;但栅介质厚度的改变要影响最佳工作点,即栅介质厚度增加, V_L 向负方向移动, V_{max} 不变,驱动脉冲幅度增加。

根据(1)式~(4)式,算得埋沟注入面密度一定时,最佳驱动脉冲及电荷处理量与埋沟结深的关系如表 1。计算时选取的参数为:埋沟注入面密度为 $1.2 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ (体浓度为均匀分布);衬底浓度为 $5 \times 10^{14}/\text{cm}^3$;栅介质二氧化硅厚度为 120 nm。

因此,CCD 驱动脉冲的最佳电位为:高电位 V_{max} ,低电位 V_L 。

由以上分析可知,埋沟 CCD 单位面积的最大电荷处理量为界面到 X_n 处的掺杂总量。即

$$Q_{max} = N_D X_n, \quad (4)$$

Q_{max} 为单位面积的最大电荷处理量,如图 6 所示。

4 实验测试结果及讨论

按照以上的计算方法,设计制作了 6000 元线阵 CCD,埋沟注入面密度为 $1.2 \times 10^{12}/\text{cm}^2$;衬底浓度为 $5 \times 10^{14}/\text{cm}^3$;栅介质二氧化硅的厚度为 850 nm。算得优化的 CCD 驱动脉冲为高电平 3.5 V,低电平为 -4.1 V,信号处理量为 $5680 \text{ e}/\mu\text{m}^2$ 。6000 元线阵 CCD 的扫描成像效果如图 7 所示。

表 1 CCD 的最佳驱动脉冲及最大电荷处理量与埋沟结深的关系

Table 1 The best operating point and maximum charge capacity of CCD as a function of buried channel junction depth

Buried channel junction depth / μm	Charg capacity / $(\text{e}/\mu\text{m}^2)$	Clock high / V	Clock low / V	Clock range / V
0.4	8800	2.90	-5.91	8.81
0.5	9010	3.53	-5.84	9.37
0.6	9130	4.14	-5.77	9.91
0.7	9190	4.73	-5.71	10.44
0.8	9210	5.31	-5.65	10.96
0.9	9220	5.87	-5.61	11.48
1.0	9220	6.41	-5.56	11.97
1.1	9210	6.94	-5.52	12.46
1.2	9190	7.46	-5.48	12.94

由表 1 可看出,在埋沟注入面密度一定时,随着结深的增加,最大电荷处理量表现为先增后降,且变化不大;驱动脉冲高电位逐渐增加,驱动脉冲低电位向正方向移动,驱动脉冲幅度逐渐增加。推结将降低体浓度,体浓度太高会带来暗电流峰^[1]。

根据(1)式~(4)式,算得衬底浓度变化对 CCD 的影响如表 2 所示。计算时选取的参数如下:埋沟注

入面密度为 $1.2 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ (体浓度为均匀分布);埋沟结深为 $0.5 \mu\text{m}$;栅介质二氧化硅厚度为 120 nm 。

表 2 CCD 的最佳驱动脉冲及最大电荷处理量与衬底浓度的关系

Table 2 The optimum operating point and maximum charge capacity of CCD as a function of substrate doping concentration

Substrate doping concentration $/(10^{14}/\text{cm}^3)$	Charge capacity $/(e/\mu\text{m}^2)$	Clock high /V	Clock low /V	Clock range /V
1	9890	4.07	-6.27	10.34
4	9170	3.63	-5.92	9.55
7	8750	3.38	-5.71	9.09
10	8440	3.21	-5.56	8.77
13	8190	3.07	-5.44	8.51
16	7980	2.95	-5.34	8.29
19	7790	2.86	-5.25	8.11
22	7630	2.77	-5.18	7.95
25	7480	2.70	-5.11	7.81

由表 2 可看出,随着衬底浓度的增加,CCD 的电荷处理量逐渐下降,驱动脉冲高电位逐渐下降,驱动脉冲低电位向正方向移动,驱动脉冲幅度逐渐降低。

参 考 文 献

- 1 James R. Janesick. Scientific Charge-Coupled Devices [M]. Bellingham: SPIE Press, 2001
- 2 M. Lesser *et al.*. Workshop on Charge Coupled Devices and Advanced Image Sensors, Bruges, Belgium, 1997
- 3 http://www.fairchildimaging.com/main/ccd_area_595.htm
- 4 B. Benwell *et al.*. Proceedings of the 2005 IEEE Workshop on Charge-Coupled Devices and Advanced Image Sensors, Karuizawa, Nagano, Japan, 2005