

载流子扩散对电荷耦合器件调制传递函数的影响*

宋 敏¹ 张 颖² 郅新凯² 郑亚茹²

(1 大连民族学院机电信息工程系, 大连 116600)

(2 辽宁师范大学物理系, 大连 116029)

摘要: 以表面沟道前射电荷耦合器件(CCD)为例,从理论上讨论了 CCD 内载流子扩散的机制,提出了利用光积分周期内收集的总信号电荷密度求 CCD 调制传递函数的方法,并获得了耗尽宽度随信号电荷密度改变时的 CCD 调制传递函数曲线,讨论了载流子扩散对传递函数的影响.利用已有的传递函数测量仪进行实验,数值模拟结果与实验结果基本吻合.

关键词: 电荷耦合器件; 调制传递函数; 载流子扩散

EEACC: 7230G

中图分类号: TN386.5

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)03-0307-05

1 引言

电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)作为一种新型的探测和成像器件,其应用已经深入到国民经济的各个领域.随着 CCD 器件应用范围的不断扩展,其市场需求量也在逐年增加.尽管如此,如何公正客观地评价 CCD 器件的成像质量,无论对 CCD 的使用者还是制造者来说仍是一个极其重要而又尚待解决的问题.近年来的研究表明:调制传递函数(modulation transfer function, MTF)已经成为公认的评价采样成像器件成像质量的有效方法^[1]. Feltz 在大量前人工作的基础上,从理论上完整地提出了理想情况下一维和二维 CCD 成像系统静态和动态的调制传递函数^[2,3].然而我们知道,像差会对传统的成像元件的 MTF 造成一定的影响.与此类似,CCD 的某些性能或缺陷也同样会引起其 MTF 的改变.因此,对影响 CCD 调制传递函数的因素进行研究将具有重要的实际意义.

自 CCD 器件出现以来,已经有许多人从不同角度对 CCD 的工作特性进行了研究^[4,5],结果表明:像元几何形状、载流子扩散、量子效率、不完全的电荷

转移、沟道类型(表面沟道与体沟道、单沟道与多沟道)等因素都会影响 CCD 的 MTF.本文从理论上讨论了 CCD 内载流子扩散的机制,提出了利用光积分周期内收集的总信号电荷密度求解 CCD 调制传递函数的方法.虽然 Seib 曾对载流子扩散对器件 MTF 的影响进行了讨论^[6],但其讨论的前提是假定器件的耗尽宽度在整个光积分周期内是不变的.事实上,当入射光强不恒定(直流信号)时,器件耗尽宽度随入射光强的变化而变化.因此,本文提出了利用光积分周期内收集的总信号电荷密度求解 CCD 调制传递函数的方法,并获得了耗尽宽度随电荷密度改变时的 CCD 调制传递函数曲线.

2 理论分析

我们以表面沟道前射(surface channel and front illumination)CCD 模型^[7]来讨论载流子扩散对 MTF 的影响,如图 1 所示.在耗尽区内产生的载流子将全部被收集在耗尽区,而在中性区内产生的载流子只有通过耗尽区与中性区的边界才能被收集,在中性区内载流子传输的机制就是扩散.产生扩散的根本原因在于载流子存在浓度梯度.在中性区

* 辽宁省自然科学基金(批准号:001064)及大连民族学院人才引进基金(编号:20036205)资助项目

宋 敏 女,1962 年出生,博士,教授,主要研究方向为成像与图像处理技术、光电检测技术.

2003-03-15 收到,2003-10-10 定稿

©2004 中国电子学会

内的载流子不仅存在纵向浓度梯度,也存在横向浓度梯度(入射辐射在横向的强度变化引起),因此会产生如图 2 所示的扩散,这种扩散必然导致 CCD 器件 MTF 的降低.

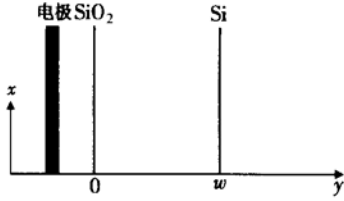


图 1 表面沟道前射 CCD 内场分布

Fig. 1 Field distribution in the surface channel and front illumination CCD

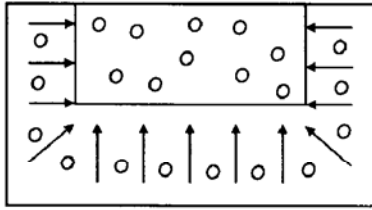


图 2 CCD 内载流子的扩散

Fig. 2 Carrier diffusion of CCD

在计算载流子扩散对 MTF 的影响时,首先假定耗尽区在 $x-z$ 平面有均匀深度,且横向电导率为 0.同时假定入射通量仅在 x 方向随 $(1 + \cos 2\pi f x)$ 变化,其中 f 为空间频率.在硅内载流子的产生率 $G(x, y, z)^{[6]}$ 为:

$$G(x, y, z) = \frac{N_0}{2} G_0(y) (1 + \cos 2\pi f x) \quad (1)$$

式中 N_0 为峰粒子通量; $G_0(y)$ 为 y 方向的产生率,该量与 CCD 的照明条件有关,它由坡印廷矢量决定.进入耗尽区的电流密度 J 由耗尽电流密度 J_w 和扩散电流密度 J_{diff} 两部分组成,即

$$J = J_w + J_{\text{diff}} \quad (2)$$

对载流子产生率 $G(x, y, z)$ 在 y 方向积分可得 J_w .

$$J_w = \int_0^w G(x, y, z) dy \quad (3)$$

式中 w 是耗尽宽度.而

$$J_{\text{diff}} = D_n \left. \frac{\partial n(x, y, z)}{\partial y} \right|_w \quad (4)$$

式中 D_n 是电子扩散常数; $n(x, y, z)$ 是中性区内载流子浓度.

若令

$$G(x, y, z) = \frac{N_0}{2} T(\lambda) \exp(-\alpha y) G_0(y) (1 + \cos 2\pi f x) \quad (5)$$

式中 α 是硅的吸收系数; $T(\lambda)$ 表示硅吸收的入射光与实际入射光的比率.利用边界条件 $n = 0$, 当 $y = w$ 及 $y = \infty$ 求解中性区内的扩散方程

$$-D_n \left[\frac{\partial^2 n}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \right] + \frac{n}{\tau} = G(x, y, z)$$

可以得到

$$J = \frac{N_0}{2} (\sigma_0 + \sigma_1 \cos 2\pi f x) \quad (6)$$

式中

$$\sigma_1 = \left[1 - \frac{\exp(-\alpha w)}{1 + \alpha L} \right] T(\lambda),$$

$$\sigma_0 = \left[1 - \frac{\exp(-\alpha w)}{1 + \alpha L_0} \right] T(\lambda)$$

$\frac{1}{L^2} = \frac{1}{L_0^2} + k^2, k = 2\pi f, L_0 = (D_n \tau_n)^{1/2}, L$ 为扩散长度.

在光积分周期内对电流密度数值积分可得到该积分周期内收集的总的信号电荷密度 $Q_s(T)^{[8]}$.

$$Q_s(T) = Q_s(0) + \int_0^T J(w) dt \quad (7)$$

由上式可知,信号电荷密度是耗尽宽度的函数,而耗尽宽度在光积分周期内又随信号电荷密度变化.

对于表面沟道 CCD,通过解泊松方程可得到耗尽宽度与信号电荷密度之间的关系如下:

$$w = - \frac{\epsilon_s}{C_{\text{ox}}} + \left[\left(\frac{\epsilon_s}{C_{\text{ox}}} \right)^2 + \frac{2\epsilon_s}{qN_A} (V_g - V_{\text{FB}} - \frac{qQ_s}{C_{\text{ox}}}) \right]^{1/2} \quad (8)$$

式中 ϵ_s 是硅的介电常数; C_{ox} 是氧化层的电容; V_{FB} 为平带电压; V_g 为门电压; q 是电子电量; N_A 是衬底杂质浓度.

现在采用如下方法计算任一光强处输出的信号电荷密度:

(1) 光积分周期初始, $Q_s(0) = 0$, 利用 (8) 式计算得到初始耗尽宽度 w_0 , 并通过 (6) 式计算得到 $J(0)$.

(2) 选取某一时间步长 T , 利用 (7) 式得到 $Q_s(T)$.

(3) 利用已得到的 $Q_s(T)$ 重新计算 w , 进而计算下一个时间步长内的电流密度 $J(T)$, 得到 $Q_s(2T)$.

(4) 重复上述步骤,即可求得整个积分周期输出的信号电荷密度 $Q_s(T)$.需要注意的是时间步长的选取要足够小,以保证对结果的影响不超过 0.001%.

为方便 MTF 的计算,我们假定入射辐射的调制度为 1, 即

$$I = 0.5(1 + \cos 2\pi f x)$$

则 MTF 可以表示为

$$\text{MTF} = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{\max} + Q_{\min}} \quad (9)$$

式中 $Q_{\max}$, $Q_{\min}$ 分别为在光强最大值处和最小值处输出的电荷密度. 对于最大值点, $\cos 2\pi f x = 1$, $J_{\max} = N_0(\sigma_0 + \sigma_i)/2$, 利用上述方法可以求得 $Q_{\max}$; 对于最小值点, $\cos 2\pi f x = -1$, $J_{\min} = N_0(\sigma_0 - \sigma_i)/2$, 可以得到 $Q_{\min}$. 将结果代入(9)式即可求得 MTF.

由前面的分析可以看出: 载流子扩散对器件 MTF 的影响主要由扩散长度和耗尽宽度决定, 而耗尽宽度则由信号电荷密度(入射光)决定.

3 数值模拟结果与讨论

为了讨论载流子扩散对器件 MTF 的影响, 分别对以下几种情况进行数值模拟和讨论.

(1) 考虑耗尽宽度随信号电荷密度改变的 MTF

利用已报道的参数^[7]: 硅衬底在入射波长为 $0.8\mu\text{m}$ 时, 吸收系数为 1000cm^{-1} , 量子效率 $\eta = 0.5$, $\epsilon_s = 12\epsilon_0$, $N_A = 5 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$, $N_0 T = 2.048 \times 10^3$, $V_G - V_{FB} = 10\text{V}$, $C_{ox} = 9.62 \times 10^{-5}\text{pF}/\mu\text{m}^2$, $L_0 = 100\mu\text{m}$, 并假定 $T(\lambda) = 1$. 采用上述方法, 作出考虑耗尽宽度随信号电荷密度改变时的 MTF 曲线, 并与 Seib 假定耗尽宽度在光积分周期内不发生改变时讨论载流子扩散得到的 MTF 曲线进行比较, 如图 3 所示. 从图中可以看出, 考虑耗尽宽度随信号电荷密度改变得到的 MTF 要略低于假定其不变时得到的 MTF, 说明耗尽宽度在光积分周期内随电荷密

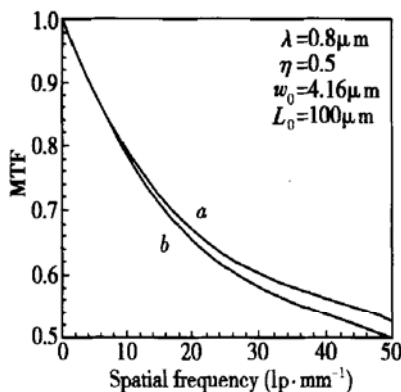


图3 耗尽宽度随电荷密度改变对 MTF 的影响 曲线 a 为 Seib 的结果.

Fig. 3 Depletion width varying with charge density effects on the MTF Curve a is Seib's result.

度的变化会降低器件的 MTF. 因此要获得更准确的器件的 MTF 曲线, 必须考虑耗尽宽度随信号电荷密度改变的情况.

(2) 入射光(信号电荷密度)对器件 MTF 的影响

仍选用以上参数, 作出入射波长分别为 $0.8\mu\text{m}$ 和 $0.6\mu\text{m}$, 即吸收系数分别为 1000cm^{-1} 和 5000cm^{-1} , 量子效率为 0.5 和 0.3 时 MTF 在空间频率为 $0 \sim 50\text{lp/mm}$ 区间内的变化曲线, 如图 4 所示. 由图可以看出, 入射光波长越长, MTF 越低; 波长越短, MTF 越高; 在入射波长相同的情况下, 量子效率高, MTF 反而低; 量子效率低, MTF 反而高. 这样的结果与硅对不同波长辐射的吸收系数不同有关. 入射光波长越长, 其吸收系数越小, 光辐射入射到硅基底内越深, 在中性区内产生的载流子的数量越多, 载流子扩散到周边像元的几率也就越大, 因此长波的 MTF 必然会小于短波的 MTF. 同样原因, 在相同的入射波长下, 量子效率越高, 中性区内产生的载流子的数量越多, 其 MTF 必然会小于量子效率低时的 MTF.

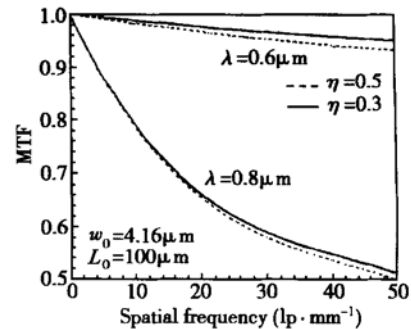


图4 入射波长对 MTF 的影响

Fig. 4 Wavelength effects on the MTF

(3) 扩散长度及耗尽宽度对 MTF 的影响

图 5 是在入射光波长为 $0.8\mu\text{m}$, 初始耗尽宽度为 $4.16\mu\text{m}$, 扩散长度分别为 $30\mu\text{m}$ 和 $100\mu\text{m}$ 时作出的 MTF 曲线. 图 6 是在扩散长度为 $100\mu\text{m}$, 初始耗尽宽度分别为 $4.16\mu\text{m}$ 和 $6.26\mu\text{m}$ 时作出的 MTF 曲线. 从图中可以看出: 随着扩散长度的增加, MTF 下降, 而随着扩散长度的减少, MTF 增加很快; 同时随着初始耗尽宽度的增加, MTF 增加. 这是因为扩散长度的增加(亦即载流子寿命的增加), 使得其扩散到周边像元的几率增加, 其结果导致 MTF 下降. 当初始耗尽宽度增加, 虽然中性区内的载流子扩散增强, 但更多的载流子在耗尽区产生并直接被

收集在其中,其结果使得 MTF 仍呈上升趋势.

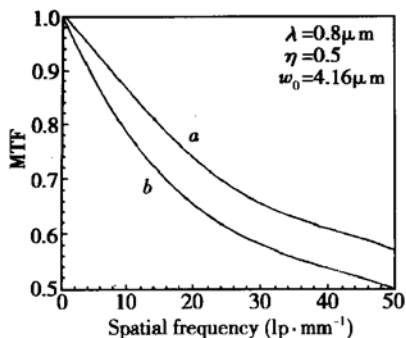


图 5 扩散长度对 MTF 的影响 曲线 *a* 为 $L_0 = 30\mu\text{m}$, 曲线 *b* 为 $L_0 = 100\mu\text{m}$

Fig. 5 Diffusion length effects on the MTF

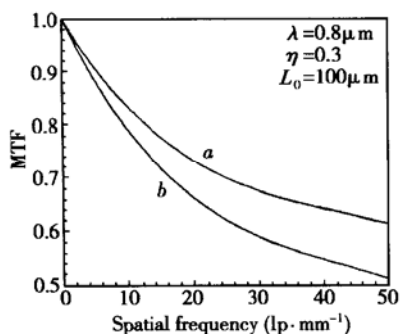


图 6 初始耗尽宽度对 MTF 的影响 曲线 *a* 为 $w = 6.26\mu\text{m}$, 曲线 *b* 为 $w = 4.16\mu\text{m}$

Fig. 6 Initial depletion width effects on the MTF

4 实验结果

选取扩散长度分别为 $15\mu\text{m}$ 和 $75\mu\text{m}$ 的线阵 CCD 器件 A 和 B (像元尺寸为 $7\mu\text{m}$), 利用自制的 CCD 传递函数测量装置进行实验^[1]. 首先用 He-Ne 激光器 (波长为 632.8nm) 做光源, 分别测量 A、B 两个器件的 MTF, 获得了在波长一定的情况下器件 MTF 随扩散长度变化的曲线, 如图 7 所示. 再用 Argon 激光器 (波长为 488.0nm) 做光源, 测量 B 器件的 MTF, 获得 MTF 随入射波长变化的情况, 如图 8 所示.

将图 7 (实验结果) 与图 5 (数值模拟结果) 进行比较发现, 当空间频率为 50lp/mm 时, 从实验曲线可以发现: 对于扩散长度分别为 $15\mu\text{m}$ 和 $75\mu\text{m}$ 的器件, 它们的 MTF 从 1.00 分别下降至 0.40 和 0.16; 而从模拟曲线得出: 对于扩散长度分别为 $30\mu\text{m}$ 和 $100\mu\text{m}$ 的器件, 它们的 MTF 从 1.00 分别

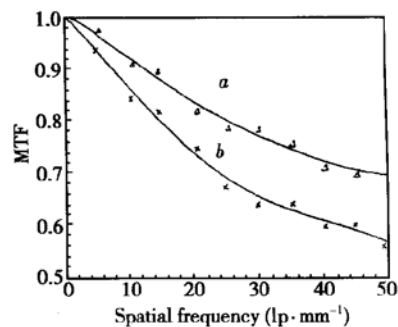


图 7 扩散长度为 $15\mu\text{m}$ (*a*) 和 $75\mu\text{m}$ (*b*) 的 MTF 曲线

Fig. 7 MTF curves for diffusion length of $15\mu\text{m}$ (*a*) and $75\mu\text{m}$ (*b*)

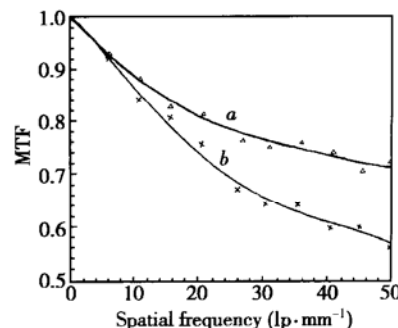


图 8 入射波长为 488.0nm (*a*) 和 632.8nm (*b*) 的 MTF 曲线

Fig. 8 MTF curves for the wavelength of 488.0nm (*a*) and 632.8nm (*b*)

下降至 0.56 和 0.50. 图 7 与图 5 均反映了随着扩散长度的增加, MTF 下降, 而随着扩散长度的减少, MTF 增加很快的特点. 由于实验与理论计算所选器件的扩散长度不同, 因此所得曲线结果有差异.

将图 8 (实验结果) 与图 4 (数值模拟结果) 进行比较可以发现, 当空间频率为 50lp/mm 时, 从实验曲线得出: 当入射光波长分别为 632.8nm 和 488.0nm 时, 器件的 MTF 从 1.00 分别下降至 0.44 和 0.18; 而从模拟曲线得出: 当入射光波长分别为 600nm 和 800nm 时, 它们的 MTF 从 1.00 分别下降至 0.95 和 0.52. 图 8 和图 4 均反映了入射光波长越长, MTF 越低, 而波长越短, MTF 越高的特点.

虽然实验曲线与数值模拟曲线总的变化趋势是吻合的, 但通过比较可以发现: 在相同的空间频率下, 实验结果较之模拟结果其相应的 MTF 值均有所下降, 出现这种差异的原因是: 虽然考查的是扩散长度或入射光波长对 MTF 的影响, 但由于实验中

其他能够影响 MTF 的因素无法完全消除, 因此势必造成实验结果与数值模拟结果相比相应的 MTF 值有所下降的情况。

5 结论

理论分析和数值模拟结果表明载流子扩散对 CCD 器件的 MTF 的影响主要表现在入射光波长、器件的耗尽宽度和扩散长度的影响。为了获得较好的 MTF, 在选择器件时, 应尽量选择扩散长度小且耗尽宽度大的器件。同时, 在计算 MTF 时必须考虑非恒定入射光引起的信号电荷密度变化对 MTF 的影响。

参考文献

[1] Hu Jiasheng, Song Min, Sun Yi, et al. Measurement of

modulation transfer function of charge-coupled devices using frequency-variable sine grating patterns. *Opt Eng*, 1999, 38 (7): 1539

[2] Feltz J, Karim M. Modulation transfer function of charge coupled devices. *Appl Opt*, 1990, 29(5): 717

[3] Feltz J. Development of the modulation transfer function and contrast transfer function for discrete systems particularly charge coupled devices. *Opt Eng*, 1990, 29(8): 893

[4] Janesick J R, Elliott T, Collins S, et al. Scientific charge-coupled devices. *Opt Eng*, 1987, 26(8): 692

[5] Janesick J R, Klaasen K P. Charge-coupled device charge-collection efficiency and the photon-transfer technique. *Opt Eng*, 1987, 26(10): 972

[6] Seib D H. Carrier diffusion degradation of modulation transfer function in charge coupled imager. *IEEE Trans Electron Devices*, 1974, ED-21: 210

[7] Crowell M H, Labuda E F. The silicon diode array camera tube. *Bell Sys Tech J*, 1969, 48: 1481

[8] Kesler M, Lomneim S. Spectral response nonuniformity analysis of charge-coupled imagers. *Appl Opt*, 1986, 25(20): 3653

Influence of Carrier Diffusion on Modulation Transfer Function of Charge Coupled Devices^{*}

Song Min¹, Zhang Ying², Gui Xinkai² and Zheng Yaru²

(1 Department of Information Engineering, Dalian Nationality University, Dalian 116600, China)

(2 Department of Physics, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: The mechanism of carrier diffusion in a charge coupled device is discussed using surface channel and front illumination as example. A method is presented for calculating the modulation transfer function (MTF) of CCD by using the total signal charge collected during a period of illumination. The MTF curve is obtained when the depletion width varies with the signal charge density. That carrier diffusion effected on the modulation transfer function is analyzed. The experiments are done by using the measuring setup of MTF, and the numerical simulating results fit with the experimental results.

Key words: charge-coupled device; modulation transfer function; carrier diffusion

EEACC: 7230G

Article ID: 0253-4177(2004)03-0307-05

^{*} Project supported by Fund of Liaoning Province Natural Science(No. 001064) and Fund of Dalian Nationality University(No. 20036205).

Song Min female, was born in 1962, PhD, professor. Her research interest includes image forming and image processing, optoelectric detecting.

Received 15 March 2003, revised manuscript received 10 October 2003

©2004 The Chinese Institute of Electronics