

文章编号:1002-2082(2009)02-0257-06

载流子扩散对 CCD 调制传递函数的影响

任航^{1,2}, 张涛¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 由于电荷耦合器件 (CCD) 具有许多优于其他成像器件的特点, 因此其应用领域已被不断地扩展, 调制传递函数 (MTF) 可作为客观评价其成像质量的有效方法。从载流子扩散对其传递函数影响出发, 分析其数学模型, 并利用该模型进一步探讨光谱不均匀性, 不同扩散长度及初始耗尽宽度对 MTF 的影响, 最后给出了仿真试验结果。

关键词: CCD; 光学传递函数; 载流子扩散

中图分类号: TN386.5

文献标志码: A

Effect of carrier diffusion on modulation transfer function of CCD

REN Hang^{1,2}, ZHANG Tao¹

(1. Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Charge-coupled device (CCD) is widely used in many fields since it has more advantages than other imaging devices. As a reliable objective method for evaluating CCDs' imaging quality, modulation transfer function (MTF) should be investigated. Proceeding from the effect of the minority carrier diffusion on MTF, the mathematic model was analyzed. The influence of spectrum non-uniformity, different diffusion length and initial depletion width on MTF was further investigated based on the model. The simulation experiment result is given.

Key words: CCD; optical transfer function; carrier diffusion

引言

调制传递函数 (MTF) 已经成为公认的评价采样成像器件质量的有效方法^[1]。对于 CCD 采样成像器件, 早在 20 世纪 80 年代初就开始用 MTF 来评价其质量^[2]。然而, 与传统成像器件不同, CCD 是离散的成像器件, 它对输入信号的采样呈线性但不是完全空间不变的过程, 这就使得 MTF 的既念用于评价 CCD 的质量时, 会与传统情况有所不同。众所周知, 像差是影响传统的连续成像器件 MTF 的主要因素, 目前已有许多人从不同角度对 CCD 的 MTF 进行了研究。结果表明, 入射信号与 CCD 像

元的位相匹配, 像元几何形状, 载流子扩散, 不完全的电荷转移和沟道类型等都会影响 CCD 的 MTF^[3], 本文主要讨论载流子扩散对 CCD 传递函数的影响。

1 CCD 基本原理及其传递函数

1.1 CCD 基本工作原理

CCD 是由许多光敏像元组合而成的全固态光电子成像器件, 每个光敏像元就是一个 MOS 电容器^[4]。它是在 P 型 Si 的衬底上生长一层 SiO₂, 然后在 SiO₂ 上淀积一排金属电极多晶硅, 在衬底和金

收稿日期: 2008-06-18; 修回日期: 2008-07-16

基金项目: 国防科技预研基金资助 (No. 1040603)

收稿日期: 任航 (1982—), 男, 吉林长春人, 在读博士, 主要从事光学工程方面的研究。E-mail: renhang10@163.com

属电极之间加上偏置电压,这样就构成了一个 MOS 电容器,如图 1 所示。

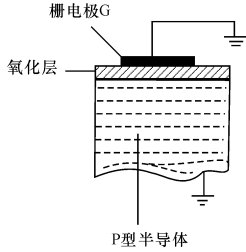


图 1 CCD 像元结构图

Fig. 1 Structure of CCD image element

一个 CCD 阵列一般由光敏区,转移栅,移位寄存器和输出区 4 个部分组成。当光信号照射到光敏区时会产生电子空穴对,P 型硅中的少数载流子电子作为信号电荷被存贮在电极下面的势阱中,通过转移栅脉冲作用,光敏区内存贮的电荷将转移至移位寄存器,移位寄存器则将光敏区送来的电荷转移到输出区,输出区再将电荷变成电压输出到 CCD,这样便完成了光电信号转换的全过程^[5]。

1.2 CCD 的调制传递函数

对于一个线性系统而言,系统对任意输入的响应都能够用某些基元函数^[2]的响应来表示。如果选择 δ 函数作为基元函数,则由函数 $g_1(x_1, y_1)$ 的筛选性质可知,输入函数可表示为

$$g_1(x_1, y_1) = \iint_{-\infty}^{\infty} g_1(\zeta, \eta) \delta(x_1 - \zeta, y_1 - \eta) d\zeta d\eta \quad (1)$$

如果用 $h(x, y; \zeta, \eta)$ 表示系统在输出平面的点 (x, y) 对输入平面坐标 (ζ, η) 上的 δ 函数输入的响应,则系统的输入和输出就可以表示成:

$$g_1(x_2, y_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} g_1(\zeta, \eta) h(x_2, y_2) d\zeta d\eta \quad (2)$$

由于 δ 函数又称为单位脉冲函数,因而函数 $h(x, y; \zeta, \eta)$ 称为系统的脉冲响应函数。在光学成像系统中,单位脉冲函数可以理解为无限小的点光源。对于一个线性光学成像系统,当一个点光源在物场中移动时,若点光源的像只改变位置而不改变它的函数形式,即脉冲响应函数不随点光源的位置 (x, y) 变化,而仅仅依赖于空间坐标的位置差 $(x - \zeta)$,则称此成像系统空间是不变的。它的脉冲响应函数可表示为

$$h(x, y; \zeta, \eta) = h(x - \zeta, y - \eta) \quad (3)$$

此时(2)式可表示成

$$g_2(x_2, y_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} g_1(\zeta, \eta) h(x_2 - \zeta, y_2 - \eta) d\zeta d\eta \quad (4)$$

对(4)式作傅里叶变换并应用卷积定理可以看出,光学系统的输出输入频谱 $G_2(f_1, f_2)G_1(f_1, f_2)$ 由下列方程联系:

$$G_2(f_x, f_y) = H(f_x, f_y)G_1(f_x, f_y) \quad (5)$$

式中 $H(f_x, f_y)$ 是脉冲响应函数的傅里叶变换,即

$$H(f_x, f_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} h(\zeta, \eta) \exp[-j2\pi(f_x \zeta + f_y \eta)] d\zeta d\eta \quad (6)$$

函数 $H(f_x, f_y)$ 称为系统的光学传递函数,它表示了系统在频域中的传递能力。

2 载流子扩散对 MTF 的影响分析

自 CCD 出现以来,已有许多人从不同角度对 CCD 的特性进行了研究,结果表明,像元几何形状,载流子扩散量子效率和不完全的电荷转移沟道类型^[5-6] 等因素都会导致 CCD 不能在理想状态下工作,其结果势必影响 CCD 的 MTF。本文主要讨论载流子扩散对 CCD 的 MTF 的影响。

2.1 CCD 的光电转换及电荷存贮分析

以 P 型硅前射 CCD 为例, MOS 电容器截面图如图 2(a) 所示。一个正电压 V_g 施加到门电极上极,门电极下极半导体中的电荷等于门电极上极的电荷(符号相反),氧化物中无电荷输运过程,当正电压施加到门电极上极时引起 P 型半导体中的空穴发生迁移,正电荷被耗尽的区域叫耗尽区(depletion region)。对于耗尽情况,小的正电压会使能带向下弯曲。

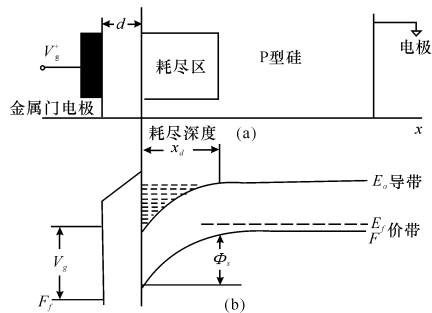


图 2 MOS 电容器截面图和费米能级图

Fig. 2 MOS capacitor section and Fermil energy level

费米能级如图 2(b) 所示。假设能带变平时耗尽^[4-6] 区均匀截止,在这个耗尽区电子(少数载流

子)可以被积累并保持在氧化物(oxide)表面,在半导体与氧化物界面的势被称为表面势 φ_s 。如果具有大于能隙的光子被吸收在耗尽区,它就会产生电子空穴对,空穴被移出耗尽区,而电子则保持在耗尽区并被收集在门电极下极。负电荷的量与施加的电压成正比,它也与氧化物厚度和门电极面积有关^[7]。

2.2 模型分析

以表面沟道(Surface channel)前射 CCD 模型为例讨论载流子扩散对 MTF 的影响。表面沟道前射 CCD 内的场分布如图 3 所示^[8]。

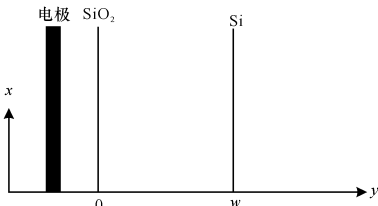


图 3 表面沟道前射 CCD 内的场分布

Fig. 3 Field distribution of surface channel front-reflection CCD

在耗尽区内产生的载流子将全部被收集在耗尽区,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扩散,如图 4 所示。这种扩散必然会降低 CCD 器件的 MTF。

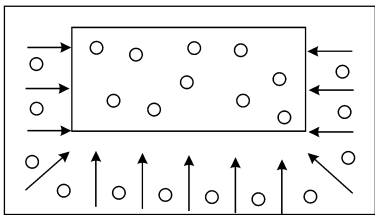


图 4 CCD 内载流子的扩散

Fig. 4 Diffusion of carrier in CCD

在计算载流子扩散对 MTF 的影响时,假设耗尽区在 $x-z$ 平面的深度均匀且横向电导率为零,同时假设入射通量仅在 x 方向随 $\{1 + \cos 2\pi f x\}$ 变化,其中 f 为 x 方向强度变化的空间频率。则在硅内电子空穴对载流子的产生率 $G(x, y, z)$ 为

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

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_w 由耗尽电流密度和扩散电流密度 J_{diff} 两部分组成,即

$$J = J_w + J_{diff} \quad (7)$$

$$J_{diff} = D_n \frac{\partial n(x, y, z)}{\partial y} \quad (8)$$

对载流子产生率 $G(x, y, z)$ 在 y 方向积分可得:

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

式中 w 是耗尽宽度。若令

$$G(x, y, z) = \frac{N_0}{2} T(\lambda) \exp(-\alpha y) \times (1 + \cos 2\pi f x) \quad (9)$$

利用边界条件 $n = 0$, 当 $y = w$ 及 $y = \infty$ 时求解中性区内的扩散方程

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

式中: $n(x, y, z)$ 为中性区内载流子浓度; D_n 为载流子扩散常数; τ 为载流子寿命。由此可得:

$$J = \frac{N_0}{2} (\sigma_0 + \sigma_f \cos 2\pi f x) \quad (10)$$

式中:

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

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

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

式中: $T(\lambda)$ 表示硅吸收的入射光与实际入射光的比率; α 是硅的吸收系数^[9]。

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 $Q_s(T)$, 即

$$Q_s(T) = Q_s(0) + \int_0^T J(w) dt \quad (11)$$

由(11)式可知信号电荷密度是耗尽宽度的函数,耗尽宽度在光积分周期内随信号电荷密度变化。若耗尽宽度在整个光积分周期内不变,仅用(11)式来求光积分周期内收集的信号电荷密度则不够精确。

对于表面沟 CCD, 可通过解泊松方程得到其耗尽宽度与信号电荷密度之间的关系^[10], 即

$$w = -\frac{\epsilon_s}{C_{ox}} + \left[\left(\frac{\epsilon_s}{C_{ox}} \right)^2 + \frac{2\epsilon_s}{qN_A} (V_G - V_{FB} - \frac{qQ_s}{C_{ox}}) \right]^{1/2} \quad (12)$$

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; Q_s 为信号电荷密度。表面沟 CCD 的 ω 与 Q_s 的关系曲线如图 5 所示。

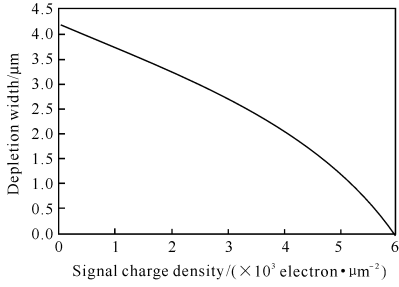


图 5 表面沟 CCD 的 ω 与关系曲线

Fig. 5 Q_s versus ω of surface channel CCD

现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(12)式计算得到初始耗尽宽度 ω_0 , 通过(10)式计算得到 $J(0)$;

2) 选取某一时间步长 T , 利用(11)式得到 $Q_s(T)$;

3) 利用已知的 $Q_s(T)$ 重新计算 ω , 然后计算下一个时间步长内的电流密度 $J(T)$, 进而得到 $Q_s(2T)$;

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, 它进一步降低对结果的影响不超过 10^{-5} 。

为方便 MTF 的计算, 假定入射辐射的调制度为 I , 即

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

则 MTF 可表示为

$$MTF = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{\max} + Q_{\min}} \quad (13)$$

式中: Q_{\max} , Q_{\min} 分别为光强最大值处和最小值处输出的电荷密度。对于最大值点, $\cos 2\pi f x = 1$, $J_{\max} = N_0(\sigma_0 + \sigma_f)/2$, 用上述方法可求得 Q_{\max} ; 对于最小值点, $\cos 2\pi f x = -1$, $J_{\min} = N_0(\sigma_0 - \sigma_f)/2$, 同理可求得 Q_{\min} , 代入(13)式即可求得 MTF。

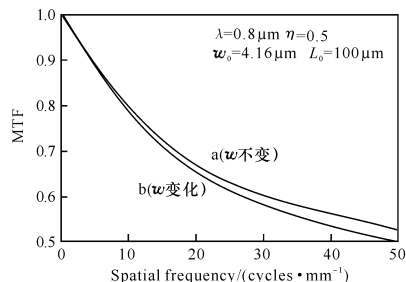
3 仿真试验及其结果分析

利用已知的参数, 硅衬底在入射波长为 $0.8 \mu\text{m}$ 时, 吸收系数为 1000 cm^{-1} , 量子效率 $\eta = 0.5$, $\epsilon_s = 12\epsilon_0$, $N_A = 5 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$, $N_0 T = 2.048 \times 10^3$, $V_G - V_{FB} = 10\text{V}$, $C_{ox} = 9.62 \times 10^{-5} \text{ PF}$, L_0

$= 100 \mu\text{m}$ 。假定 $T(\lambda) = 1$, 采用上述方法作出耗尽宽度随电荷密度改变时的 MTF 曲线, 并与假定耗尽宽度在光积分周期内不发生改变时 Seib 得到的 MTF 曲线进行比较, 结果如图 6(a)所示。从图 6(a)可以看出, 耗尽宽度随信号电荷密度改变的 MTF 要略低于假定其不变时得到的 MTF, 这说明耗尽宽度在光积分周期内随电荷密度的变化会降低器件的 MTF, 但是影响很小。

仍选用以上参数, 作出波长为 $0.8 \mu\text{m}$ 和 $0.6 \mu\text{m}$, 即吸收系数分别为 1000 cm^{-1} 和 5000 cm^{-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 6(b)所示。由图 6(b)可以看出, 入射光波波长越长 MTF 越低, 波长越短 MTF 越高, 同一入射波长时量子效率高, MTF 反而低, 量子效率低, MTF 反而高, 这与硅对不同波长辐射的吸收系数不同有关。入射光波波长越长, 其吸收系数越小, 光辐射入射到硅内越深, 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 必然小于短波的 MTF。同一入射波长时量子效率越高, 中性区内产生的载流子的数量越多, MTF 也必然小于量子效率低时的 MTF。

图 6(c)是在波长为 $0.8 \mu\text{m}$, 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(d)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 6(c)和(d)可以看出, 随着扩散长度 L_0 的增加, MTF 下降, 而随着 L_0 的减少, MTF 增加很快, 同时随着初始耗尽宽度的增加, MTF 也增加。这是因为扩散长度的增加即载流子寿命的增加使得其扩散到周边像元的几率增大, 其结果是导致 MTF 下降。初始耗尽宽度增加时虽然中性区内的载流子扩散增强, 但更多的载流子在耗



(a) ω 随 Q_s 改变对MTF的影响

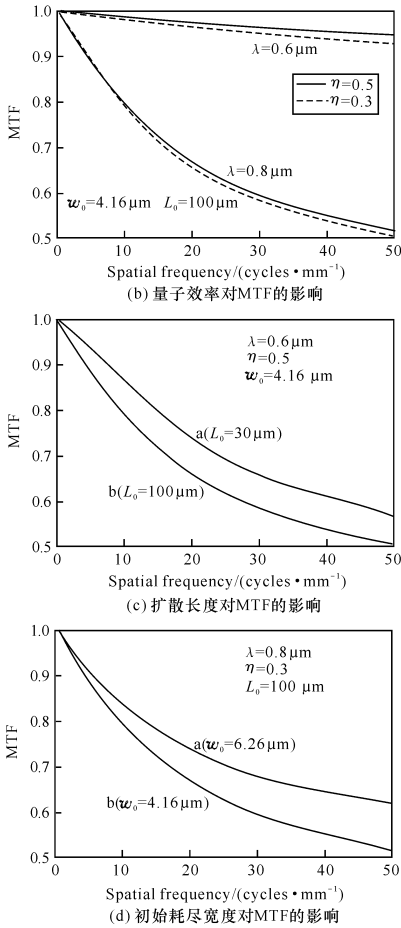


图6 MTF曲线

Fig.6 Curve of MTF

尽区产生并直接被收集在其内,最终使MTF仍呈上升趋势。

4 结论

本文以 Seib 和 Blouke 的载流子扩散模型为理论基础,以前射 CCD 为例提出了考虑耗尽宽度在光积分周期内随电荷密度变化时的 MTF 模型,并与假定其不变的 MTF 进行比较,发现耗尽宽度的变化影响 CCD 的 MTF,但影响很小。利用该模型进一步探讨了光谱、不均匀性、不同扩散长度及初始耗尽宽度对 MTF 的影响。由于载流子扩散引起的 MTF 下降与输入辐射的波长有关,所以非理想工作状态下 CCD 阵列的 MTF 又与输入辐射的波长

有关,波长越长 MTF 越低。

参考文献:

- [1] 江孝国,谭肇,李泽仁,等. 影响 CCD 调制传递函数因素研究[J]. 光子学报,2003,32(7):830-833.
JIANG Xiao-guo, TAN Zhao, LI Ze-ren, et al. The study on the factors effecting CCD modulated transfer function[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(7):830-833. (in Chinese)
- [2] 公发全,刘海涛,张晓辉,等. 亚像元线阵 CCD 推扫成像系统调制传递函数分析方法[J]. 光学技术,2002,28(3):239-240.
GONG Fa-quan, LIU Hai-tao, ZHANG Xiao-hui, et al. MTF analysis method of subpixel linear matrix CCD push-scanning image system [J]. Optical Technique, 2002,28(3):239-240. (in Chinese)
- [3] 宋敏,郜新凯,郑亚茹. 像元几何形状对 CCD 调制传递函数的影响[J]. 光电子. 激光,2001,12(1):34-36.
SONG Min, GUI Xin-kai, ZHENG Ya-ru. Influence of geometric shape of CCD pixel on the modulation transfer function[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2001,12(1):34-36. (in Chinese)
- [4] 宋敏,郜新凯,郑亚茹. 非理想情况下的 CCD 调制传递函数的综合表示方法[J]. 光学技术,2003,29(6):720-722.
SONG Min, GUI Xin-kai, ZHENG Ya-ru. Comprehensive expression of modulation transfer function for non-ideal charge coupled devices [J]. Optical Technique, 2003, 29(6):720-722. (in Chinese)
- [5] 杨桦,焦文春,朱永红,等. CCD 相机在系统奈奎斯特频率处的调制传递函数[J]. 光学学报,2002,22(3):313-316.
YANG Hua, JIAO Wen-chun, ZHU Yong-hong, et al. Modulation transfer function of CCD camera at Nyquist frequency[J]. Acta Optica Sinica, 2002,22(3):313-316. (in Chinese)
- [6] 郭悦,刘晓鹏,杨桦. CCD 的调制传递函数(MTF)分析[J]. 航天返回与遥感,2004,21(3):29-32.
GUO Yue, LIU Xiao-peng, YANG Hua. MTF analysis for CCD[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2004,21(3):29-32. (in Chinese)
- [7] 万春明,佟首峰. CCD 相机调制传递函数的测试原理分析[J]. 半导体光电,2002,23(1):40-43.
WAN Chun-ming; TONG Shou-feng. Analysis on

testing principle for modulation transfer function of CCD camera [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2002,23(1):40-43. (in Chinese)

- [8] 车双良,汶德胜,李轶,等. 亚像元动态成像技术中系统的调制传递函数[J]. 应用光学, 2002,23(3):42-44.
CHE Shuang-liang, WEN De-sheng, LI Yi, et al. Modulation transfer function of systems in subpixel

dynamic imaging technique [J]. Journal of Applied Optics, 2002,23(3):42-44. (in Chinese)

- [9] SCHNEIDER W, FINK W. Integral sampling in optics[J]. Optica Acta, 1976,23(12):1011-1028.
[10] IFTEKHARUDDIN K M, KARIM M A. Acquisition by staring focal plane arrays: pixel geometry effects[J]. Opt. Eng., 1993,32(11):2649-2656.