

CMOS 图像传感器像元 MTF 与 SNR 设计方法

王耕耘*, 谢莉莉, 卜洪波

北京空间机电研究所, 北京 100094

摘要 CMOS 图像传感器常采用像元在奈奎斯特频率处的调制传递函数(MTF)值对成像质量进行评价。MTF 主要由孔径 MTF 和扩散 MTF 的频域乘积得到, 其中孔径 MTF 与 CMOS 图像传感器像元的物理结构相关, 扩散 MTF 主要由感光区 p-n 结的工艺参数决定, 同时工艺参数会影响像元的量子效率(QE), 进而影响信噪比(SNR)。从 CMOS 图像传感器像元的工艺参数出发, 详细分析了 MTF 函数和 SNR 的理论机理, 并列举了 300~1000 nm 光谱段中 8 个典型光波长条件下 CMOS 图像传感器像元的 MTF 和 SNR 的计算结果, L 型灵敏度孔径的像元在奈奎斯特频率处的孔径 MTF 为固定值 0.67, 奈奎斯特频率处的扩散 MTF 随入射光波长的变大而减小, QE 在 800 nm 入射光波长条件下达到峰值 85.8%, 而相同读出噪声和暗电流条件下的 SNR 也在 800 nm 处达到峰值 124。

关键词 成像系统; 图像传感器; 调制传递函数; 孔径; 量子效率; 信噪比

中图分类号 V47; TP212

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2011002

Design Method of Pixel Modulation Transfer Function and Signal-to-Noise Ratio for CMOS Image Sensor

Wang Gengyun*, Xie Lili, Bu Hongbo

Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094

Abstract The modulation transfer function (MTF) value of complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) image sensors pixels at Nyquist frequency is typically used to evaluate the imaging quality. The MTF is mainly calculated by taking the frequency domain product of the aperture MTF and the diffusion MTF. The aperture MTF is determined by the physical structure of the CMOS image sensor pixel, whereas the diffusion MTF is determined primarily by the process parameters of the p-n junction in the photosensitive region. Simultaneously, the process parameters will affect the quantum efficiency (QE) of pixels, which will then affect the signal-to-noise ratio (SNR). The theoretical mechanism of MTF function and SNR is examined in detail in this paper, and the calculation results of MTF and SNR of CMOS image sensor pixels under 8 typical optical wavelengths in the 300–1000 nm spectral band are listed. The MTF of the pixel with L-shaped sensitivity aperture at Nyquist frequency is fixed at 0.67, the diffusion MTF at Nyquist frequency decreases as incident light wavelength increases, the peak value of QE is 85.8% at 800-nm incident light wavelength, and the peak value of SNR is 124 at 800 nm under the same reading noise and dark current.

Key words imaging system; image sensors; modulation transfer function; aperture; quantum efficiency; signal-to-noise ratio

OCIS codes 110.4280; 010.0280; 280.4788

收稿日期: 2020-11-30; 修回日期: 2021-01-12; 录用日期: 2021-01-21

通信作者: *wanggy16@126.com

1 引言

CMOS 图像传感器逐步取代 CCD 器件成为高分辨率成像系统的核心元件,其精细的像元尺寸、灵活的片上处理电路和丰富的成像模式等优势随着 CMOS 工艺的发展愈加明显。随着 CMOS 图像传感器像元尺寸逐渐减小,空间分辨率不断上升,奈奎斯特频率处的调制传递函数(MTF)越来越难以提升。同时对于 F 数相同的光学系统,在像元尺寸相同的条件下,CMOS 图像传感器的 MTF 数值越高,成像细节就越丰富,降低感光孔径来提高 MTF 成为了 CMOS 图像传感器的一种发展方向。但降低像元的感光孔径会降低量子效率,最终导致信噪比(SNR)减损,而只有较高的信噪比才能得到更清晰的成像结果。综上,兼顾像元 MTF 和 SNR 的设计才能提高最终的成像质量。

国内围绕 MTF 和 SNR 的影响因素展开了相关研究。文献[1]用深空背景中常见的星点作为在轨 MTF 测量的目标,结合点源法研究其在轨 MTF 测量的方法,利用高斯拟合定位和多图配准重构点扩展函数,提出最终基于星点的 MTF 检测方法。文献[2]基于狭缝法测试 MTF 的原理,采用十字狭缝靶进行测试得到线扩展函数(LSF)曲线,然后对其进行去噪处理和离散傅里叶变换得到 MTF 曲线。文献[3]设计了大视场、低成本、高解析力的高性能手机镜头光学系统,中心视场的调制传递函数值在奈奎斯特频率为 $200 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处大于 0.5,在奈奎斯特频率为 $400 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处大于 0.2。文献[4]以同轴三反像差理论为基础,运用仿真软件确定满足设计要求的初始结构参数,设计光学系统的工作波段为 $200 \sim 1200 \text{ nm}$,焦距为 2800 mm 。文献[5]基于 Shannon 公式,提出了一种综合评价航天相机性能的新判据,给出了用系统的 MTF 与 SNR 的乘积大于等于 9 来综合评价航天相机性能的方法。该方法为航天高分辨率相机的研制提供了参考。文献[6]在被动成像系统像质评价的基础上综合考虑了主动成像系统的特点,建立了激光选通主动成像系统的 MTF 模型,通过建立 SNR 与光源均匀性的关系模型提出了对主动成像系统照明激光空间均匀性的定量评价方法,仿真计算结果与实验结果十分吻合。文献[7]分析了平台运动、传感器成像性能、大气扰动等因素对遥感图像的影响,并提出一种基于空域的自适应调制传递函数补偿(MTFC)遥感图像复原算法,该方法根据实验室实

测的 MTF 值以及用户的需求值确定不同频率处 MTF 的补偿值,在提升图像清晰度的同时保证了图像的 SNR。

以上研究主要从测试方法、光学设计、数据处理、计算方法和成像模式等方面阐述了 MTF 和 SNR 的影响因素和改善方法,多是依据成像后的图像数据进行后处理分析,缺乏从 CMOS 图像传感器像元设计角度出发的 MTF 和 SNR 的机理性研究。本文研究 CMOS 图像传感器像元的 MTF 和 SNR 的物理机理,从 CMOS 图像传感器灵敏度分布引入的孔径 MTF、光生电流引入的扩散 MTF 和 SNR 三个参数出发,分别建立相关的函数模型,并对 CMOS 图像传感器在近红外谱段的参数进行了计算分析。

2 CMOS 图像传感器像元 MTF 与 SNR

2.1 CMOS 图像传感器像元的孔径 MTF

CMOS 图像传感器是由二维离散分布的灵敏度区域组成的^[8],成像的过程可以看作空间采样过程,其采样系统响应符合空间采样定理,即只有最高频率低于奈奎斯特频率的信号才能被还原。

对于一个给定的 CMOS 图像传感器而言,它的感光区域的形状是固定的,并且其有着独特的灵敏度分布函数,通常这一灵敏度分布可表示为

$$s(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{A}, & (x, y) \in P \\ 0, & (x, y) \notin P \end{cases}, \quad (1)$$

式中 A 代表图像传感器灵敏度孔径面积, P 表示单个像元的二维区域。

图 1 为 CMOS 图像传感器像元的感光区在不同形状灵敏度孔径的分布条件下 MTF 的二维分布情况,从图中可以看出随着空间频率的变大,MTF 在不同空间方向上有着不同的下降梯度,提高奈奎斯特频率处的 MTF 数值就是通过对感光区孔径的设计,最大限度地减小 MTF 的下降梯度,其中如图 2 所示的 CMOS 图像传感器感光区 L 型灵敏度孔径就是 MTF 下降梯度较小的一种。

图 2(a)所示的 CMOS 图像传感器为共享电路型的 4 晶体管像元,图中用虚线标出的 L 型区域就是该像元的灵敏度区域。该灵敏度区域是由多数载流子为电子的 N 型半导体构成,该区域和 P 型衬底叠层连接形成 PN 结。CMOS 图像传感器在栅极处于高电压的情况下完成非平衡载流子的收集。

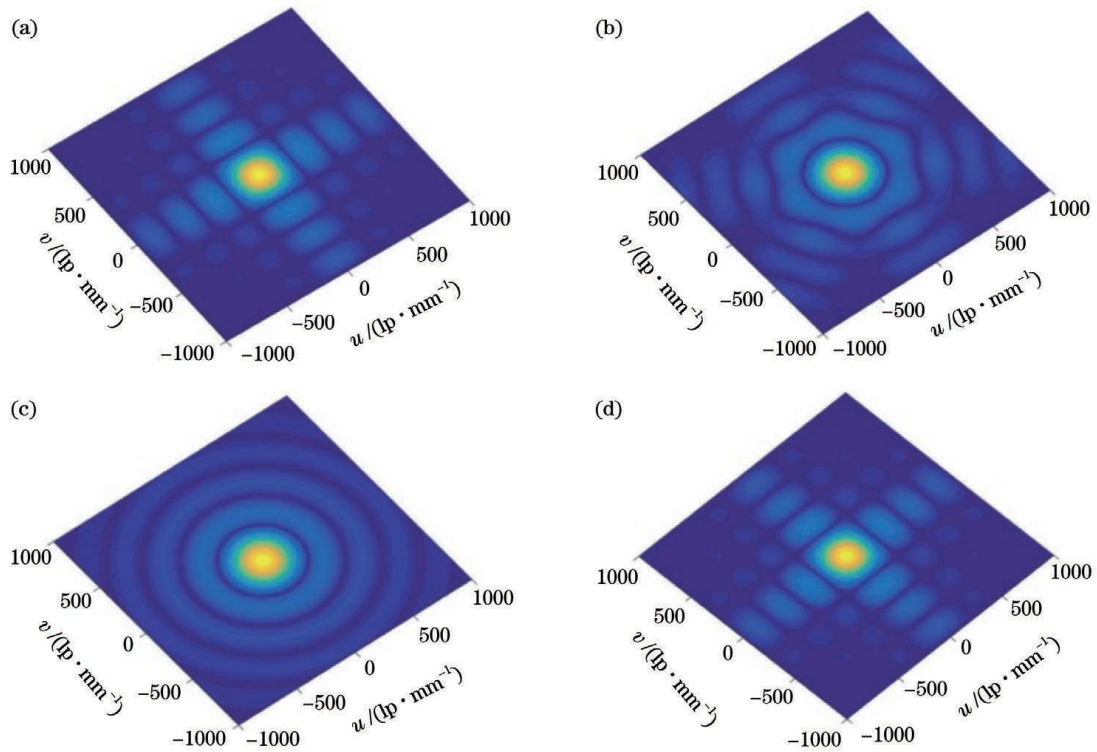


图 1 CMOS 图像传感器不同形状灵敏度孔径条件下的 MTF 分布。(a)灵敏度孔径为菱形;(b)灵敏度孔径为六边形;(c)灵敏度孔径为圆形;(d)灵敏度孔径为矩形

Fig. 1 MTF distribution of CMOS image sensor with different shape sensitivity apertures. (a) Rhomb-shaped active area; (b) hexagon-shaped active area; (c) circular-shaped active area; (d) rectangular-shaped active area

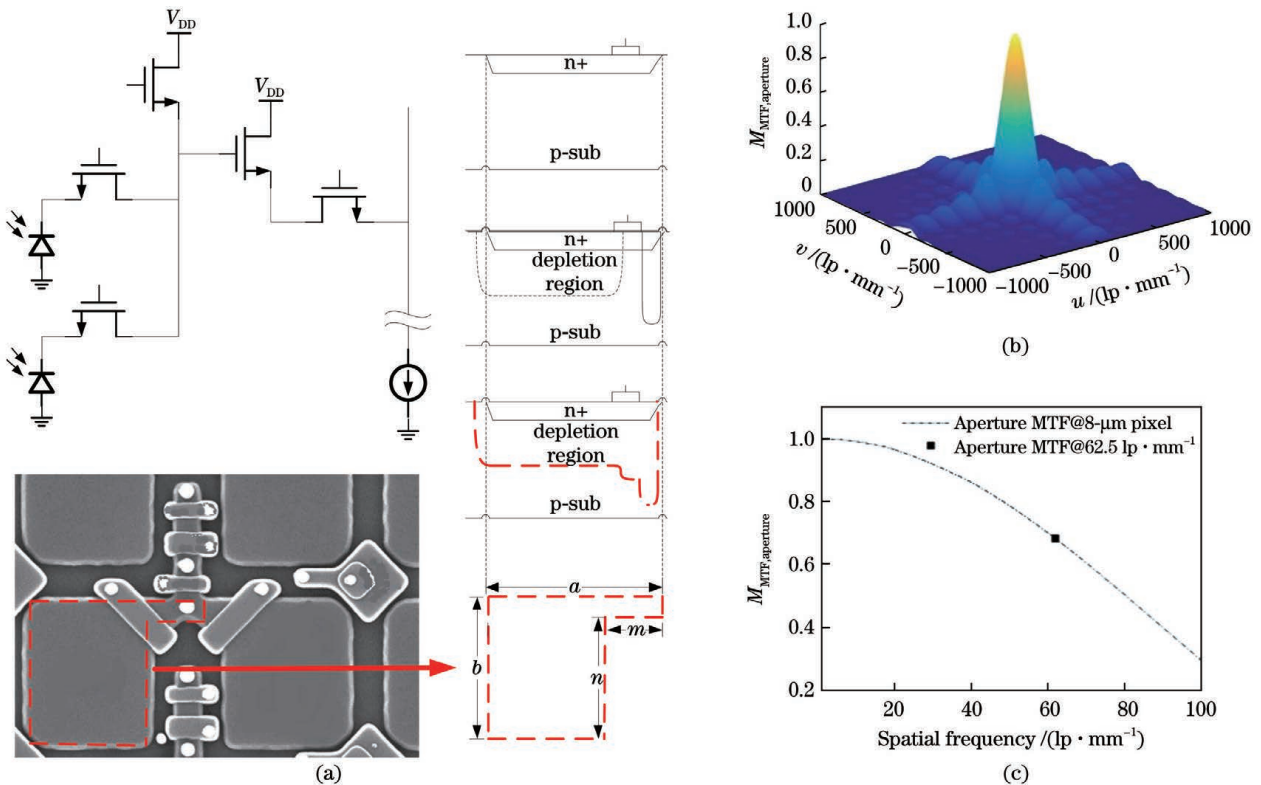


图 2 CMOS 图像传感器孔径 MTF。(a)像元灵敏度分布;(b)孔径 MTF 的 3 维分布;(c)孔径 MTF 的 2 维分布
Fig. 2 Aperture MTF of CMOS detector. (a) Sensitivity profile of pixel; (b) 3D distribution of aperture MTF; (c) 2D distribution of aperture MTF

图中用虚线标出的 L 型区域外边缘线包含 a 、 b 、 m 和 n 四段,将这四个参数代入灵敏度分布函数可得

$$s(x, y) = \frac{1}{ab - mn}, \quad (2)$$

调制传递函数可通过对(2)式进行傅里叶变换 $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 获得,即

$$M_{\text{MTF}} = |S(u, v)| = |\mathcal{F}\{s(x, y)\}| \quad |M_{\text{MTF}} = |S(u, v)| = |\mathcal{F}\{s(x, y)\}|. \quad (3)$$

由 CMOS 图像传感器灵敏度分布引入的孔径 MTF 为

$$M_{\text{MTF, aperture}} = \frac{m(b-n)}{ab-mn} \text{sinc}(mu, (b-n)v) \exp(j\pi um) \cdot \exp[-j\pi v(b-n)] + \frac{b(a-m)}{ab-mn} \text{sinc}((a-m)u, bv) \exp[-j\pi u(a-m)] \cdot \exp[-j\pi v(b-2n)]. \quad (4)$$

根据 $8 \mu\text{m}$ 像元间距的 CMOS 图像传感器灵敏度区域的尺寸,可以得到参数为 $a = 6 \mu\text{m}$, $b = 5 \mu\text{m}$, $m = 0.5 \mu\text{m}$ 和 $n = 4.5 \mu\text{m}$,将这些参数代入到 MTF 公式中,可以得到如图 2(b)和图 2(c)所示的孔径 MTF 随空间分布变化的情况。

依据奈奎斯特频率的定义,可以得到 $8 \mu\text{m}$ 像元间距 L_{pitch} 条件下的奈奎斯特频率为

$$f_{\text{Nyquist}} = \frac{1}{2 \times L_{\text{pitch}}} = \frac{1}{2 \times 8 \mu\text{m}} = 62.5 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}. \quad (5)$$

孔径 MTF 的主要影响因素是灵敏度孔径的大小,像元间距为 $8 \mu\text{m}$ 的 CMOS 图像传感器在 $6 \mu\text{m}$ 灵敏度孔径条件下沿 x 轴方向的奈奎斯特频率处的孔径 MTF 为 0.67。

2.2 CMOS 图像传感器像元的扩散 MTF

硅材料的带隙能量 E_g 是 1.1 eV,根据光电转换原理,若一定通量的光子以高于 E_g 的能量进入半导体时,波长短于 1100 nm 的光子会被硅吸收,并发生光子到信号电荷的转换。

光子通量吸收的连续性方程可表示为

$$\frac{d\Phi(x)}{dx} = -\alpha \cdot \Phi(x), \quad (6)$$

式中 α 是吸收系数,与波长相关,其物理意义为光在介质中传播距离 $1/\alpha$ 时,光的强度衰减为原来的 $1/e$ 。 α 的表达式为

$$\alpha = \frac{4\pi}{\lambda} k, \quad (7)$$

式中: k 是负折射率 n 的虚部,是表征光强衰减的参数,即消光系数; λ 为入射光波长。吸收系数 α 与波

长成反比,故入射光子波长越长,吸收系数越低。在吸收系数计算的过程中,吸收系数 α 随波长的变化曲线通常可表示为

$$\alpha(\lambda) = 4 \times 10^4 \sqrt{\frac{hc}{\lambda} \left(\frac{hc}{\lambda} - E_g \right)}. \quad (8)$$

图 3 为硅材料光吸收系数随波长的变化曲线。因为光子通量随表面距离的增加呈指数性衰减,且不同波长的光子吸收深度不同,如:室温条件下,蓝光(450 nm)的穿透深度仅为 $0.4 \mu\text{m}$,而红光(600 nm)的穿透深度达到 $2.44 \mu\text{m}$,故长波长的光子能够进入到材料的更深区域,硅材料的光生电荷会传递更长距离才能被收集。更长的传播路径导致更多的载流子扩散,扩散带来的 MTF 反比于非平衡载流子的扩散长度,最终导致长波长光子入射带来的 MTF 参数降低。扩散带来的 MTF 与入射光子的波长有关,其表达式为

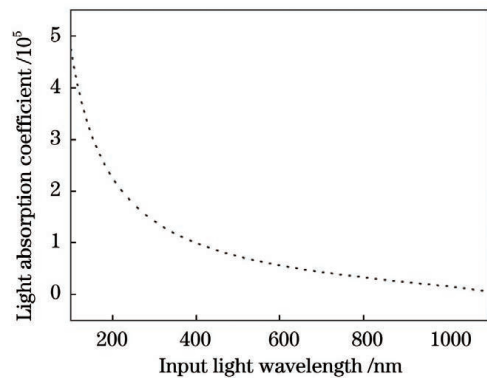


图 3 硅材料光吸收系数随波长变化曲线

Fig. 3 Light absorption coefficient of silicon material varies with wavelength

$$M_{\text{MTF, diffusion}}(u, v, \lambda) = \left| \frac{\mathcal{F}\{p_{\text{prf}}(x, y, \lambda)\}}{\mathcal{F}\{p_{\text{prf}}(x, y, \lambda)\}_{u, v=0}} \right| = \frac{P_{\text{PRF}}(u, v, \lambda)}{P_{\text{PRF}}(0, 0, \lambda)}, \quad (9)$$

式中 u 和 v 是二维空间坐标,是 x 和 y 方向上的频域坐标。根据半导体理论,可得光电二极管阵列的点扩

展函数 p_{prf} 为

$$p_{\text{prf}}(x, y, \lambda) = D_p \left. \frac{\partial p(x, y, z)}{\partial z} \right|_{z=z_n} + D_n \left. \frac{\partial n_{\text{epi}}(x, y, z)}{\partial z} \right|_{z=z_d} + \int_{z_n}^{z_d} G(x, y, z, \lambda) dz, \quad (10)$$

式中: D_p 和 D_n 分别为 N 区的空穴扩散系数和外延层 P 区的电子扩散系数; z_n 和 z_d 分别为有源区上下边缘的深度; $p(x, y, z)$ 为 N 区非平衡空穴浓度; $n_{\text{epi}}(x, y, z)$ 为外延层光激发非平衡电子浓度; $G(x, y, z, \lambda)$ 为非平衡载流子产生速率, 其表达式为

$$G(x, y, z, \lambda) = \Phi_0(\lambda) \cdot \alpha(\lambda) \cdot \exp(-\alpha z) \cdot \delta(x, y), \quad (11)$$

其中 $\Phi_0(\lambda) \cdot \exp(-\alpha z)$ 为 z 方向的人射光通量分布, $\alpha(\lambda)$ 为与波长相关的吸收系数, δ 为二维采样函数。值得注意的是, 此处的采样函数与 2.1 节计算孔径 MTF 时采用的灵敏度采样函数不同, 这主要是因为 L 型的灵敏度区域的感光区域不包含凸出区域, 而 CMOS 图像传感器的布线通道覆盖了凸出区域, 且该凸出区域是没有光通量注入的, 所以此处的 $\delta(x, y)$ 只与光通量区域相关。

CMOS 图像传感器通常由在 P 型衬底上淀积的 P 型外延层上的 N 型扩散区构成的光电二极管阵列组成。如图 4 左侧所示, 通用 CMOS 光电

图像传感器工艺中, 通常衬底为重掺杂 P 型区, 厚度为 $z = z_s = 12 \mu\text{m}$, 外延层为在衬底上淀积的一层轻掺杂 P 型外延层, 该外延层厚度为 $z = z_{\text{epi}} = 11 \mu\text{m}$, 衬底和外延层界面处因为掺杂浓度不同而形成同型 P+/P 结。该同型结的内建电场可以把衬底层界面附近的非平衡载流子导入外延层, 阻止在较深区域产生的非平衡载流子流向衬底层, 由此提高对长波长光子如红光波段光子的吸收效率, 提高该波段的量子效率。像元中感光区通常由 n+ 和外延层 P-epi 之间的有源区构成, 有源区形成的空间电场将有源区外生成的光电荷吸引至该有源区, 光生电荷的多寡代表了该像元感光的多少, 有源区上下边缘的深度分别为 $z_n = 0.9 \mu\text{m}$ 和 $z_d = 4.7 \mu\text{m}$ 。有源区在 xy 方向的分布为非布线通道区域, 通常 CMOS 图像传感器的布线通道为水平垂直交叉的矩形区域, 而被布线通道包围的有源区的形状为宽为 $r = 6 \mu\text{m}$, 长为 $n = 6 \mu\text{m}$ 的矩形区域。

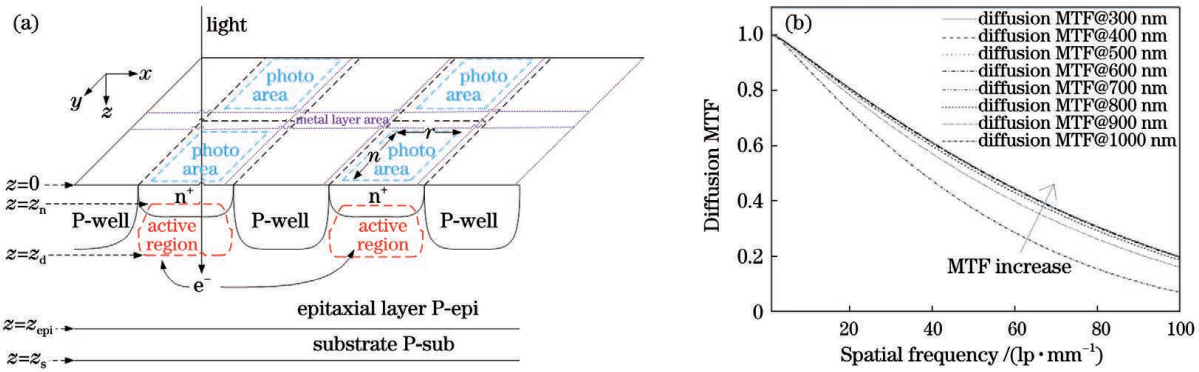


图 4 CMOS 工艺中 P 型衬底叠加 P 型外延层的像元结构及扩散 MTF。(a) 像元结构; (b) 扩散 MTF 随入射光波长变长而减小
Fig. 4 Pixel structure of P-type substrate superimposed P-type epitaxial layer in CMOS process and diffusion MTF.

(a) Pixel structure; (b) diffusion MTF increases with the decrease of incident light wavelength

通用 CMOS 图像传感器在沿 z 方向的人射光作用下每一个界面处的光生电荷都遵循稳态连续性方

程, 在 n+ 区/外延层 epi 的界面处、外延层 epi/衬底的界面处和衬底表面三个界面处的连续性方程^[9-12] 如下:

$$\begin{cases} -D_p \nabla^2 p(x, y, z) + \frac{p(x, y, z)}{\tau_p} = \Phi_0 \cdot \alpha \cdot \exp(-\alpha z) \cdot \delta(x, y) \\ -D_e \nabla^2 n_e(x, y, z) + \frac{n_e(x, y, z)}{\tau_e} = \Phi_0 \cdot \alpha \cdot \exp(-\alpha z) \cdot \delta(x, y), \\ -D_s \nabla^2 n_s(x, y, z) + \frac{n_s(x, y, z)}{\tau_s} = \Phi_0 \cdot \alpha \cdot \exp(-\alpha z) \cdot \delta(x, y) \end{cases} \quad (12)$$

式中 D_i 为硅材料的扩散系数, τ_i 为载流子寿命, $i=p, e, s$, 分别代表上述三个界面。

对(12)式左右两侧进行傅里叶变换, 引入空间频域的变量 $P(u, v, z)$ 、 $N_e(u, v, z)$ 和 $N_s(u, v, z)$ 表示光生载流子在三个界面处的空间频域分布, 其中硅材料的扩散系数 D_i 和载流子寿命 τ_i 的乘积等于载流子扩散长度 L_i 的平方, 则有

$$\begin{cases} -\frac{\partial^2 P(u, v, z)}{\partial^2 z} + \frac{P(u, v, z)}{L_p^2} = \frac{\Phi_0 \cdot \alpha \cdot \exp(-\alpha z)}{D_p} \\ -\frac{\partial^2 N_e(u, v, z)}{\partial^2 z} + \frac{N_e(u, v, z)}{L_e^2} = \frac{\Phi_0 \cdot \alpha \cdot \exp(-\alpha z)}{D_e} \\ -\frac{\partial^2 N_s(u, v, z)}{\partial^2 z} + \frac{N_s(u, v, z)}{L_s^2} = \frac{\Phi_0 \cdot \alpha \cdot \exp(-\alpha z)}{D_s} \end{cases} \quad (13)$$

偏微分方程(13)式的解代入到傅里叶变换后的点扩展方程中, 可得

$$P_{\text{PRF}}(u, v, \lambda) = D_p \left. \frac{\partial P(u, v, z)}{\partial z} \right|_{z=z_n} + D_e \left. \frac{\partial N_e(u, v, z)}{\partial z} \right|_{z=z_d} + \Phi(u, v, z, \lambda) \Big|_{z=z_d}^{z=z_n}, \quad (14)$$

$$\begin{cases} M_{\text{MTFP}}(u, v) = \frac{D_p}{L_p} \left[B_p \exp\left(-\frac{z_n}{L_p}\right) - A_p \exp\left(-\frac{z_n}{L_p}\right) + \frac{\Phi_0 \cdot \alpha^2 \cdot L_{kp} \cdot \exp(-\alpha z_n)}{D_p \left(\alpha^2 - \frac{1}{L_p^2}\right)} \right] \text{sinc}(ur, vn) \\ M_{\text{MTFNe}}(u, v) = \frac{D_e}{L_e} \left[B_e \exp\left(-\frac{z_d}{L_e}\right) - A_e \exp\left(-\frac{z_d}{L_e}\right) + \frac{\Phi_0 \cdot \alpha^2 \cdot L_{ke} \cdot \exp(-\alpha z_d)}{D_e \left(\alpha^2 - \frac{1}{L_e^2}\right)} \right] \text{sinc}(ur, vn) \end{cases}, \quad (15)$$

代入 MTF 函数后可得

$$M_{\text{MTF}}(u, v, \lambda) = \frac{P_{\text{PRF}}(u, v, \lambda)}{P_{\text{PRF}}(0, 0, \lambda)} = \frac{M_{\text{MTFP}}(u, v) + M_{\text{MTFNe}}(u, v) + \Phi(u, v, \lambda)}{M_{\text{MTFP}}(0, 0) + M_{\text{MTFNe}}(0, 0) + \Phi(0, 0, \lambda)}, \quad (16)$$

其中 $\Phi(u, v, \lambda)$ 代表了光生电流函数, 表达式为

$$\Phi(u, v, \lambda) = \Phi_0 [\exp(-\alpha z_n) - \exp(-\alpha z_d)] \text{sinc}(ur, vn). \quad (17)$$

扩散 MTF 的主要影响因素是感光区域的大小, 由于布线区域的存在, CMOS 图像传感器的感光区域只占像元面积的一部分。图 4(b) 给出在 CMOS 图像传感器像元尺寸为 $8 \mu\text{m}$ 的条件下, $6 \mu\text{m}$ 感光区域内的扩散 MTF 随空间频率的变化情况。从中可以看出, 感光区域的空间分布导致扩散 MTF 相对理想成像系统有一定程度的降低, 且入射光波长越长, 奈奎斯特频率处的扩散 MTF 越小。

2.3 CMOS 图像传感器像元的量子效率与信噪比

入射光进入 CMOS 图像传感器感光区域产生光电荷, 光电荷进入并存储于空间电荷区。总的光生电荷包含两部分, 一部分为产生于耗尽区的光生载流子被收集形成的光电荷, 表达式为

$$q_{\text{collected}} = \Phi(u, v, z, \lambda) \Big|_{z=z_n}^{z=z_d}, \quad (18)$$

一部分为能够扩散到空间电荷区的载流子组成的光电荷, 表达式为

$$q_{\text{diffusion}} = D_p \left. \frac{\partial P(u, v, z)}{\partial z} \right|_{z=z_n} + D_e \left. \frac{\partial N_e(u, v, z)}{\partial z} \right|_{z=z_d}. \quad (19)$$

内量子效率为光生电荷与进入衬底中的光子数的比值, 而进入衬底的光子数为器件表面入射光子数与透射系数的乘积, 所以内量子效率可表示为

$$I_{\text{IQE}}(\lambda) = \frac{q_{\text{collected}} + q_{\text{diffusion}}}{\Phi_0} = \frac{P_{\text{PRF}}(0, 0, \lambda)}{\Phi_0(\lambda) T(\lambda)}, \quad (20)$$

量子效率为内量子效率与衬底层透射系数的乘积, 故量子效率的表达式为

$$Q_{\text{QE}}(\lambda) = I_{\text{IQE}}(\lambda) \cdot T(\lambda) = \frac{P_{\text{PRF}}(0, 0, \lambda)}{\Phi_0(\lambda)}. \quad (21)$$

将 $P_{\text{PRF}}(0, 0, \lambda)$ 代入(21)式可得

$$Q_{QE}(\lambda) = \frac{T(\lambda)}{\Phi_0} \cdot \left\{ \frac{D_n}{L_n} \left[-A_n \exp\left(-\frac{z_d}{L_n}\right) + B_n \exp\left(\frac{z_d}{L_n}\right) - \alpha \gamma_n \exp(-\alpha z_d) \right] \right\} + \frac{T(\lambda)}{\Phi_0} \cdot \left\{ -\frac{D_p}{L_p} \left[-A_p \exp\left(-\frac{z_n}{L_p}\right) + B_p \exp\left(\frac{z_n}{L_p}\right) - \alpha \gamma_p \exp(-\alpha z_n) \right] + \Phi_0(\lambda) \right\}. \quad (22)$$

信噪比为固定入射光子数条件下的光生电荷数和噪声电子数的比值,信噪比与量子效率、积分时

间、入射光子数、暗电流电子数和读出噪声电子数相关。信噪比公式如下:

$$S_{SNR} = 20 \times \lg[Q_{QE}(\lambda) \cdot t \cdot \Phi] - 10 \times \lg[Q_{QE}(\lambda) \cdot t \cdot \Phi + I_{dark} \cdot t + N_{read}], \quad (23)$$

式中 I_{dark} 为暗电流, N_{read} 为读出噪声电子数。

依据(20)式可知量子效率也与图像传感器的感光区域相关,感光区域越大,量子效率越大,在相同

的暗电流、积分时间、读出噪声和入射光子数条件下,量子效率越大,信噪比越大(图 5)。

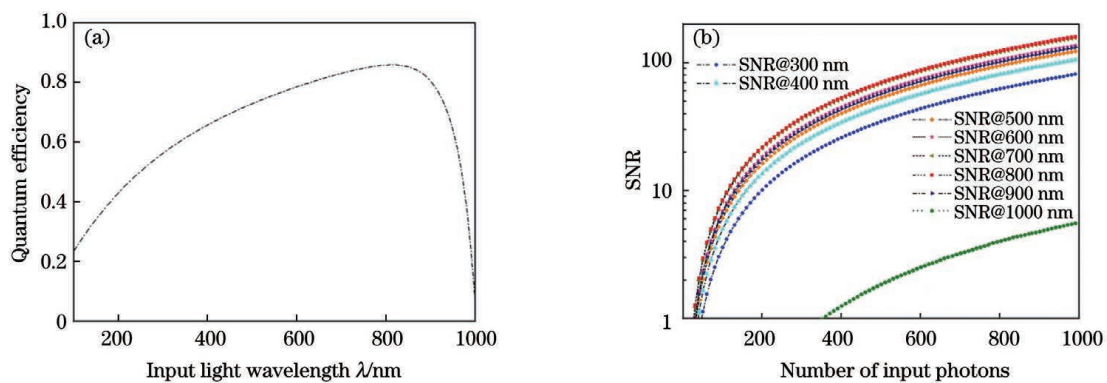


图 5 量子效率和信噪比随入射波长变化的关系图。(a)量子效率曲线;(b)信噪比曲线

Fig. 5 QE and SNR with the change of the input wavelength. (a) QE line; (b) SNR lines

3 分析与讨论

综上,孔径 MTF 和扩散 MTF 有着不同的影响因素和计算函数,但都和开口大小有关。这里的开口分别代表灵敏度孔径和感光区域,图像传感器像元开口越小,MTF 越大。但开口变小会导致量子效率下降,进而降低 SNR。通常把两种 MTF 函数在频域中通过相乘的关系得到综合的 MTF 函数^[13-16],即

$$M_{MTF, total} = M_{MTF, aperture} \times M_{MTF, diffusion}. \quad (24)$$

综合 MTF 函数能够表征 CMOS 图像传感器的细

节分辨能力。

接着,依据 MTF 和 SNR 函数,计算了一种像元间距为 $8 \mu\text{m}$,感光区域边长为 $6 \mu\text{m}$ 的 CMOS 图像传感器在奈奎斯特频率 $62.5 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 处的 MTF 和 SNR 参数,CMOS 图像传感器因为布线通道和像元感光区同时处于进光面,所以像元感光区小于像元面积。同时,对 $300 \sim 1000 \text{ nm}$ 波长范围内 8 种不同入射波长条件下的 QE 和 SNR 分别进行了计算,假设入射光子数均为 800,暗电流均为 $1 \text{ e}^- \cdot \text{pixel}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,积分时间统一设定为 0.1 s ,计算结果如表 1 所示。

表 1 $8 \mu\text{m}$ 像元结构的 MTF 和 SNR

Table 1 MTF and SNR of $8\text{-}\mu\text{m}$ pixel structures

| Input light wavelength λ / nm | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Aperture MTF @ $62.5 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ | 0.67 | | | | | | | |
| Diffusion MTF @ $62.5 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ | 0.423 | 0.423 | 0.422 | 0.422 | 0.418 | 0.407 | 0.375 | 0.263 |
| Total MTF @ $62.5 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ | 0.283 | 0.283 | 0.283 | 0.283 | 0.28 | 0.27 | 0.25 | 0.17 |
| QE / % | 48.9 | 60.5 | 68.9 | 75.3 | 84.2 | 85.8 | 73.1 | 6.6 |
| SNR @ λ | 62 | 81 | 95 | 106 | 121 | 124 | 102 | 4 |

由表 1 可以看出 L 型灵敏度孔径会随着 CMOS 图像传感器的版图和工艺制造等环节固定下来,奈奎斯特频率像元孔径 MTF 在固定像元版图布局条件下为固定值 0.67。

如(16)式和(21)式所示,扩散 MTF 和 QE 都和 PN 结的光生电流 $\Phi(u, v, \lambda)$ 有关,入射光子在硅基衬底中的吸收系数不同导致短波长光子入射时光生电流较大,长波长光子入射时光生电流较小,所以扩散 MTF 会随入射光子波长变大而减小,而 QE 会随入射光子波长的变大先升高后降低。

硅基衬底中波长越长的光子吸收系数越小,导致长波长入射光子入射时奈奎斯特频率处的扩散 MTF 较低,同时在衬底深处引入了串扰,所以在衬底深处可通过增大像元间隔度来提高长波长光子入射时的扩散 MTF。

QE 随入射光波长的变化先增大后减小,峰值位于 800 nm,这个数值随着衬底厚度的变化而变化,设计中可以通过调整 CMOS 工艺的参数,如继续增加外延层厚度(目前外延层厚度 12 μm)来提高近红外光波长的量子效率。

4 结 论

提出孔径 MTF、扩散 MTF 和 SNR 的设计方法。该方法从基本的工艺参数出发,提高了 CMOS 图像传感器像元 MTF 和 SNR 的设计准确度。针对 CMOS 图像传感器感光区灵敏度的分布,计算了多种形状下的 MTF 梯度,并重点介绍了 L 型分布感光区灵敏度下的 MTF。将像元 PN 结的掺杂浓度和深度参数作为约束条件,同时完成了扩散 MTF 和 QE 的计算,然后代入 SNR 公式中计算特定暗电流和积分时间下的 SNR。计算结果表明在几个典型光波长条件下 CMOS 图像传感器的 MTF 和 SNR 参数与商用芯片的吻合度较高,可以作为 CMOS 图像传感器研制优化的参考。未来,将从如何同时提高 CMOS 图像传感器像元的 MTF 和 SNR 的角度开展进一步的研究工作。

参 考 文 献

- [1] Chen L X, Rao P, Sun Y Y, et al. On-orbit modulation transfer function measurement method of space cameras based on star points [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(16): 161102.
陈丽焯, 饶鹏, 孙莹莹, 等. 基于星点的空间相机在轨调制传递函数测量方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(16): 161102.
- [2] Ni J Y, Wang L Z, Wang H, et al. Research on measurement technology of the MTF of low-light level image intensifiers [J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(12): 1161-1166.
倪进园, 王璐子, 王颢, 等. 微光像增强器的 MTF 测试技术研究 [J]. *红外技术*, 2019, 41(12): 1161-1166.
- [3] Guo Z Y, Li J C, Chen T X, et al. Design of single-center and ultra-wide-angle mobile phone lenses [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(7): 072204.
郭智元, 李建聪, 陈太喜, 等. 单中心超广角手机镜头设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(7): 072204.
- [4] Wang Z Q, Wang C Y, Sun H, et al. Design of off-axis three-mirror optical system for dynamic target simulation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(1): 012203.
王志强, 王春艳, 孙昊, 等. 动态目标模拟离轴三反光学系统的设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(1): 012203.
- [5] Chen R L, Fan X W, Li Y C. Study on synthetically evaluating image quality of aero-cameras [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(4): 434-436.
陈荣利, 樊学武, 李英才. 基于信息理论的航天相机性能评价研究 [J]. *光学技术*, 2004, 30(4): 434-436.
- [6] Li Q, Wang Y G, Wang X W, et al. Simulative and experimental study on the MTF and SNR of range gated laser imaging system [J]. *Laser Journal*, 2008, 29(4): 31-33.
黎全, 王雁桂, 王小伟, 等. 激光选通成像系统 MTF 与 SNR 的仿真与实验研究 [J]. *激光杂志*, 2008, 29(4): 31-33.
- [7] Zhou N, Qi W W, Cao S X, et al. Adaptive MTFC restoration algorithm of remote sensing images based on spatial domain [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2015, 36(4): 54-62.
周楠, 齐文雯, 曹世翔, 等. 基于空域的自适应 MTFC 遥感图像复原算法 [J]. *航天返回与遥感*, 2015, 36(4): 54-62.
- [8] Shcherback I, Yadid-Pecht O. CMOS APS MTF modeling [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, 48(12): 2710-2715.
- [9] Djité I, Magnan P, Estribeau M, et al. Theoretical evaluation of MTF and charge collection efficiency in CCD and CMOS image sensors [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7427: 742705.
- [10] Djité I, Magnan P, Estribeau M, et al. Modeling and measurements of MTF and quantum efficiency in CCD and CMOS image sensors [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7536: 75360H.

- [11] Djité I, Magnan P, Estriebeau M, et al. Analytical modeling of MTF and QE of CCD and CMOS image sensors [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7826: 78261O.
- [12] Djité I, Estriebeau M, Magnan P, et al. Theoretical models of modulation transfer function, quantum efficiency, and crosstalk for CCD and CMOS image sensors[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2012, 59(3): 729-737.
- [13] Estriebeau M, Magnan P. Pixel crosstalk and correlation with modulation transfer function of CMOS image sensor[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5677: 98-108.
- [14] Zhang M X, Liu L Y, Li Y, et al. The influence of SNR on MTF measurement [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9795: 97951N.
- [15] Liu C, Lin J, Tseng M. Design of CMOS sensor fill factor for optimal MTF and SNR[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7826: 78261N.
- [16] Bardoux A, Gimenez T, Jamin N, et al. Dynamic MTF measurement[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10565: 1056504.