

# 可应用于 CMOS 彩色图像传感器的两层垂直层叠结构及其色彩特性的研究

陈 远 徐之海 冯华君

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 基于两层垂直层叠结构的色彩传感器可同时对偏蓝波段和偏红波段进行感应, 配合绿/品红滤波片, 为彩色成像提供了可能, 由于它完全兼容于标准 CMOS 工艺, 可以作为一种新型的 CMOS 彩色图像传感器像素的感光功能器件。通过垂直层叠结构, 配合两色滤波片, 抽取不同深度的光生载流子, 即可以得到相应波段的成像信息。通过仿真和实验得到了它的各通道响应曲线, 提出了一种增强了对声稳健性的多个多项式回归的方法并得到色彩转换矩阵, 把传感器的 4 通道响应转换为 CIE XYZ 三刺激值。同时在 CIE  $L^* A^* B^*$  空间中对器件传感得到的色彩和原始的色彩坐标进行了比对, 对器件的色彩准确度进行了一个量化评估。结果表明在应用新转换方法, 色彩误差大大优于常用的简单线性转换, 其色彩效果甚至优于商用 Bayer 滤光片式彩色 CCD。

**关键词** 色彩传感器; 彩色成像; CMOS 成像传感器; 垂直层叠结构; 多个多项式回归

**中图分类号** TN36 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092905.1264

## Vertically Integrated Diode for CMOS Color Image Sensor and Its Colorimetric Characterization

Chen Yuan Xu Zhihai Feng Huajun

(*State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University,*  
*Hangzhou, Zhejiang 310027, China*)

**Abstract** The vertically integrated diode can sense blue and red illumination simultaneously, and can provide full color information with green/magenta filter on it. It can also be used in the CMOS image sensor for its fully compatibility with standard CMOS process. Through extraction of photogenerated carriers at different depths by vertically integrated diode with two color filters, the full color image is got. Through simulation and experiment, each channels response curve is got, an enhanced sound-robust method with multi-polynomial regression is proposed, and the color space transform matrix is obtained. The sensors four-channel response is converted to CIE XYZ three-stimulus-values. In the CIE  $L^* A^* B^*$  space, comparison between coordinate and sensed color coordinate is proposed, and the apparatus color accuracy is quantitatively evaluated. The result shows that the device colorimetric accuracy is superior to that of a simple linear transformation, even better than commercial colorful CCD with Bayer filter.

**Key words** color sensor; color imaging; CMOS image sensor; vertically integrated diode; multiple polynomial regression

## 1 引 言

准确高效地获取图像的色彩信息是半导体图像

传感器 (CCD, CMOS image sensor) 的重要指标之一。目前商用 CCD/CMOS 大多是通过一定模式 (如

收稿日期: 2008-09-17; 收到修改稿日期: 2008-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(60577047)资助项目。

作者简介: 陈 远(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事 CMOS 图像传感器像素结构和模拟读出前端电路方面的研究。

E-mail: cy@zju.edu.cn

导师简介: 徐之海(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事空间相机和图像传感器方面的研究。E-mail: xuzh@zju.edu.cn

(通信联系人)

本文彩图效果请检索中国光学期刊网(www.opticsjournal.net)相应文献。

最常见的 Bayer pattern<sup>[1]</sup>)排列的微型彩色滤光片覆盖在每一个感光像素的上面获取图像,再通过内插得到完整的彩色图像数据。这种方法的优点是,获得的图像色彩还原度极佳;同时像素列阵的读出电路设计和布局布线简单。它的缺点在于由于各个方向上的采样频率和相位不同,因此一旦图像的高频部分超奈奎斯特频率就会发生失真,增加了彩色叠栅条纹的概率。

近年来,随着对垂直层叠结构研究的深入,垂直层叠多通道成像成为彩色成像的一个新潮流<sup>[2~12]</sup>,它的原理就是利用不同波长的光在半导体材料内的吸收深度不同。RGB 三通道成像甚至更多的六通道成像能够提供超越普通基于 CFA 彩色成像更好的色彩还原和更少的色彩失真。但同时三色感光的像素需要专用的工艺才能得到较好的色彩还原效果;另一种折中的办法是使用两层层叠像素同时配合两色滤光片获得四个通道的响应<sup>[9,10]</sup>,再转换到 RGB 三通道色彩响应。这样一方面使之于标准 CMOS 工艺兼容并可以通过合适的配色滤光片的应用提高各通道的色彩分离性能,另一方面由于二色 CFA 空间采样频率的一致性比 Bayer 型 CFA 更好,可以减轻彩色叠栅条纹现象。

本文首先解释了器件的原理结构,然后对它的色彩特性进行了研究,并提出了一种改进的拟合方法以得到准确的色彩还原。

## 2 器件结构和原理

基于垂直层叠结构的多通道传感器的基本原理是利用不同波长的光在硅材料中透射深度的非线性分布,即:短波长可见光主要在近表面被吸收,长波长的近外光主要在更深的位置被吸收。该特性为使用不同深度,不同光学带宽的光电二极管探测入射光的色彩甚至扩展成像光谱至近红外近紫外<sup>[13]</sup>提供了可能。图 1 为红(650 nm),绿(550 nm),蓝(450 nm)三种颜色的单色光在硅沿深度方向的产生率。

图 2 是器件的结构示意图。使用了标准 n 阱 CMOS 工艺内具有的 p<sup>+</sup>/n 阱/p 衬底结构,因此可以直接作为 CMOS 图像传感器像素。通过两个电极分别引出 p<sup>+</sup> 和 n 阱区域的光电流信号(注意 CMOS 工艺中的 p 衬底总是接地,所以无法从这端得到信号)。

偏蓝色光主要在 p<sup>+</sup>/n 阱结附近区域被吸收,在该区域的产生的电子空穴对在电场的作用下分

离,位于导带的光生电子流向 n 阱电极,位于价带的光生空穴流向 p<sup>+</sup> 电极;偏红光主要在 n 阱/p 衬底区域被吸收,光生电子流向 n 阱电极,而光生空穴流向 p 衬底的地。因此, I<sub>1</sub> 主要包含蓝绿波段信息, I<sub>2</sub> 同时包含偏蓝绿波段偏红波段信息。

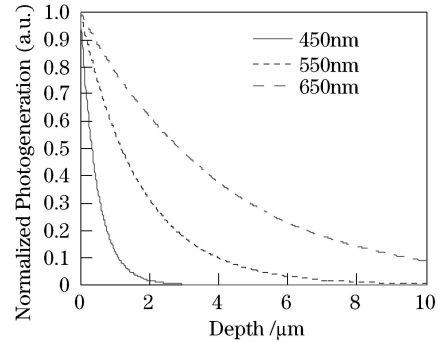


图 1 RGB 单色光在在硅内部的归一化光生少数载流子产生率

Fig.1 Normalized photogeneration of RGB light in bulk silicon

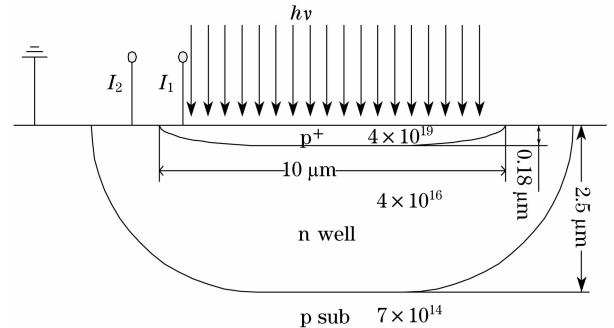


图 2 器件结构剖面示意图

Fig.2 Cross section of device implemented in CMOS process

## 3 数值仿真和实验结果

使用的器件仿真器为 Taurus Medici,但是没有采用仿真器内部自带的 Si 光吸收参数,而是使用了文献[14]中给出的相关数据。模拟的器件结构设置为:光源为  $1 \times 10^{17}$  photon/cm<sup>2</sup>s,波长 380 ~ 780 nm,宽度为 10 μm 的垂直入射平行光;由使用工艺(CSMC 0.6 μm DPDM mixed mode)的工艺参数文档计算得到的结构参数为:p<sup>+</sup>区域掺杂浓度  $7 \times 10^{19}$  cm<sup>-3</sup>,n 阱区域掺杂浓度  $4 \times 10^{16}$  cm<sup>-3</sup>,p 衬底掺杂浓度  $7 \times 10^{14}$  cm<sup>-3</sup>;p<sup>+</sup>/n 阱节深 0.18 μm,n 阱/p 衬底节深 2.5 μm,为了减少总的仿真格点数加快仿真速度,取 p 衬底厚度为 80 μm。同时由工艺的布局规则文档,使用最小的 0.6 μm 大小的触点,触点最小距离 p<sup>+</sup>/n 阱边缘分别为 0.4 μm 和

0.8  $\mu\text{m}$ ,  $\text{p}^+$  和  $\text{n}$  阱最小距离 1.8  $\mu\text{m}$ ; 在满足这些条件下选择  $\text{p}^+$  区域横向尺寸为 10  $\mu\text{m}$ ,  $\text{n}$  阱区域横向尺寸为 14  $\mu\text{m}$ 。偏置电压为  $V_1 = V_2 = 0 \text{ V}$ , 即仿真结短路电流, 具体结构见图 2。图 3 为仿真得到的器件量子效率(Q. E.)。

在 CSMC 0.6  $\mu\text{m}$  DPDM mixedmode CMOS 工艺上制备了实验器件进行光谱响应实测, 该工艺没有采用深亚微米工艺中常用的对光不透明的硅化物层来降低互联电阻, 因此对量子效率没有明显的影响。

测量得到两层层叠光电二极管的量子效率曲线如图 4 所示。

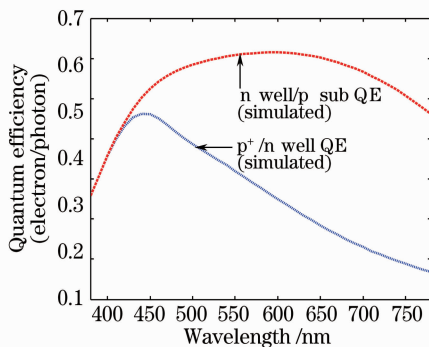


图 3 仿真得到的垂直层叠结构器件的量子效率  
Fig. 3 Simulated quantum efficiency (QE) of the vertically integrated diode

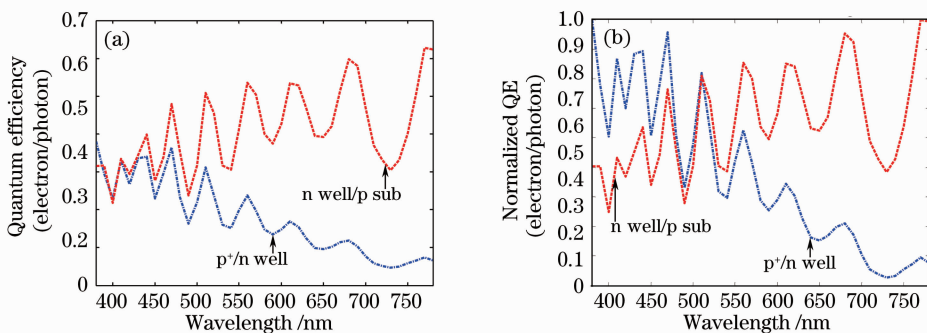


图 4 实测得到的器件量子效率

Fig. 4 Measured quantum efficiency of the integrated diode

可以观察到,  $\text{p}^+/\text{n}$  阱结的响应主要集中在 550 nm 之前, 也就是对蓝绿光具有较强的响应。而  $\text{n}$  阱/ $\text{p}$  衬底结的响应更加偏向于 600 nm 以上的偏红光, 但是同时它也包含了蓝绿光的响应, 这与前一段  $I_2$  电流成分的分析相符。

另外, 与图 3 的数值仿真得到的量子效率曲线相比, 实测得到的量子效率曲线上有相当大的波纹起伏, 在一定程度上影响到了器件的响应效率。这是由于 CMOS 工艺在器件表面的钝化层和金属引线层的绝缘物质为透明的  $\text{SiN}$  和  $\text{SiO}_2$ , 它们形成了光学薄膜对不同波长的入射光有干涉消光作用, 但

是可以通过一定厚度的  $\text{SiO}_2$  薄膜近似<sup>[15]</sup>。

工艺文档上给出的覆盖在扩散区上的钝化层厚度为 2.05  $\mu\text{m}$ , 通过与实测曲线比对, 在计入 2  $\mu\text{m}$  厚度的单层非晶  $\text{SiO}_2$  的干涉效应以后(如图 5 所示), 仿真得到的量子效率曲线跟实测有了较好的吻合, 如图 6 所示。

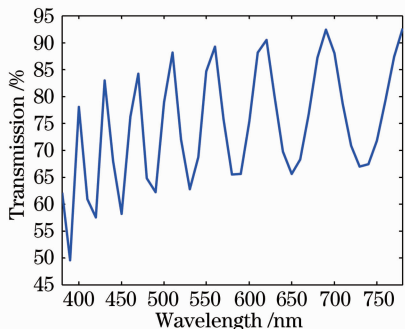


图 5 厚度为 2  $\mu\text{m}$  的非晶硅  $\text{SiO}_2$  的透过率曲线  
Fig. 5 Transmission of 2  $\mu\text{m}$  amorphous  $\text{SiO}_2$  overlay

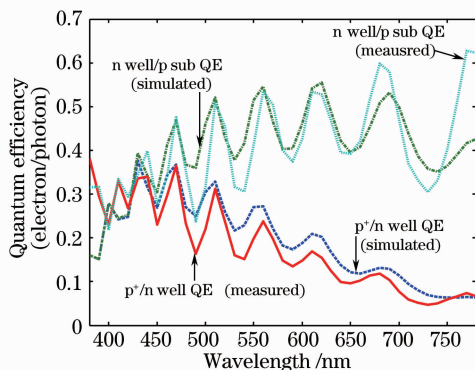


图 6 模拟和实测得到的器件量子效率的比较  
Fig. 6 Comparison between the measured and simulated QE of the integrated diode

根据两层层叠结构的量子效率曲线, 即分别对蓝绿光敏感和偏红光敏感, 选择了绿色和品红色滤色片配合得到色彩分离度更好的响应。从绿色滤色

片配合层叠结构得到绿色通道信息；同时从品红色滤色片(截止绿色光,通过蓝色和红色光)配合层叠结构分别得到蓝色通道和红色通道信息。另外,注意到 N 阱/P 衬底结对于超过 650 nm 以上的红光有很强响应,但是实际上人眼对于这个波段的红光响应很弱,如果不加以滤除会影响到器件的色彩还原度,通常的做法是加一块对 650 nm 以上波长光进行截止的 IRCUT 滤波片。

最终实测得到两侧层叠结构配合绿/品红二色滤光片得到的 4 种响应的量子效率曲线如图 7 所示。

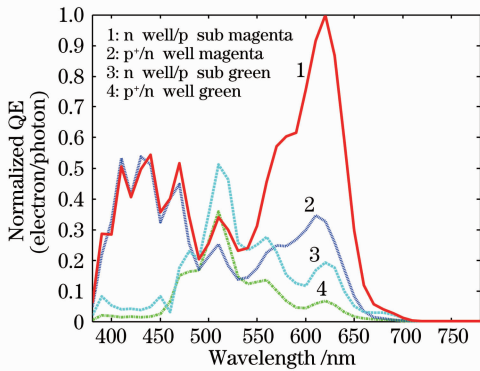


图 7 实测得到配合二色滤色片以后的器件得到的 4 通道响应的量子效率

Fig. 7 Measured four-channel responded quantum efficiencies of the integrated diode with two color filters

### 4 器件的色彩特性

由图 7 可以看到,在配合绿色滤色片的时候,两个通道同时表现出较好的绿色响应。当应用品红色滤色片时,两个通道的响应表现出几乎完全一致的蓝色响应;而在红色区域,两个同时表现出红色响应,但 n 阱/p 衬底明显强于 p<sup>+</sup>/n 阱。这是同样是由于 n 阱/p 衬底引出的光电流信号其实包括了 p<sup>+</sup>/n 阱的光电流,这虽然给色彩分离的后处理带来一定难度,但是完全可以通过对各通道信号的线性变换来获得正确的颜色信息<sup>[16~19]</sup>。

在常见的成像器件色彩转换中,应用的最多的是直接对器件各通道响应的简单线性变换。它的过程可以通过矩阵运算表达为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & m_{1,3} & m_{1,4} \\ m_{2,1} & m_{2,2} & m_{2,3} & m_{2,4} \\ m_{3,1} & m_{3,2} & m_{3,3} & m_{3,4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中列向量  $I$  代表从器件得到 4 通道响应, $M$  为转

换到 XYZ 三刺激值的变换矩阵,其中

$$\begin{aligned} X &= k \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \\ Y &= k \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \\ Z &= k \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda; \quad (2) \\ I_1 &= C \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) QE_1(\lambda) d\lambda, \\ I_2 &= C \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) QE_2(\lambda) d\lambda, \\ I_3 &= C \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) QE_3(\lambda) d\lambda, \\ I_4 &= C \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) QE_4(\lambda) d\lambda, \quad (3) \end{aligned}$$

(2)式和(3)式里  $\varphi(\lambda)$  为进入器件的颜色的光谱能量分布,  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  为 CIE 推荐的标准色度观察者的光谱三刺激曲线,  $k$  为调整系数。计算得到的 XYZ 即为这种颜色的标准三刺激值,也就是我们转换的目标值。  $QE_1 - QE_4$  为器件 4 个通道的量子效率曲线,  $C$  为调整系数,计算得到的  $I_1 - I_4$  即为对这种颜色的器件输出响应,也就是能得到转换输入值。

通过对 CIE 推荐的 14 种色彩和 4 种灰度进行拟合即可得到变换矩阵  $M$ ,使用上面简单的变换过程最终得到的变换矩阵  $M$  为

$$\begin{bmatrix} -0.1135 & -0.0528 & 0.1084 & 0.0812 \\ 0.0331 & -0.1026 & 0.2301 & 0.0345 \\ 0.3124 & 0.3842 & -0.3035 & -0.0893 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

色彩还原效果如图 8 所示。



图 8 18 种原始色彩和使用简单线性变换得到的测得色彩的比较(上半部分为原始色彩,下半部分为测得色彩)

Fig. 8 Comparison of the 18 original and the measured colors using simple transform (the upper for original color and bottom for measured color)

可以看到大部分色彩都得到了满意的效果,但是第 9,11,12 号颜色出现了不小的偏差,特别是第 9 号的红色,已经成为橘红色。

把变换得到的 XYZ 三刺激值和原始的 XYZ 三刺激值变换到 CIE  $L^* A^* B^*$  均匀色彩空间中比较,得到平均色彩误差  $E_{ab} = 6.88$ ,均方差  $\sigma E_{ab} = 9.78$ ,同时最大误差  $E_{ab\_max}$  达到了不可接受的 40.12,这说明对于具有复杂的多通道响应曲线的器件来说,简单的线性变换效果欠佳,在需要较高色彩还原的场合不适用。

为了提高色彩准确度,应用了多个多项式回归 (Multiple polynomials regression)<sup>[18,19]</sup> 的方法,并对其进行了改进,提高了得到的转换矩阵对输入量噪声的鲁棒性。

本方法的二阶形式可以用矩阵运算表达为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{1,1} & \cdots & m_{1,13} \\ m_{2,1} & \cdots & m_{2,13} \\ m_{3,1} & \cdots & m_{3,13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ 1 \\ I_1 I_2 \\ I_2 I_3 \\ I_3 I_4 \\ I_1 I_4 \\ I_1^2 \\ I_2^2 \\ I_3^2 \\ I_4^2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

二阶多项式回归得到的  $M$  为

$$\begin{bmatrix} -0.0950 & -0.0527 & 0.1048 & 0.0808 & -0.2458 & -0.0001 & -0.0001 & 0.0004 & 0.0006 & -0.0014 & 0.0000 & -0.0005 & -0.0001 \\ -0.0125 & -0.1399 & 0.3053 & 0.0408 & -1.0157 & -0.0004 & -0.0006 & 0.0004 & 0.0016 & -0.0028 & 0.0003 & -0.0004 & -0.0002 \\ 0.4058 & 0.4962 & -0.4802 & -0.1133 & 3.0507 & 0.0023 & -0.0004 & -0.0006 & -0.0009 & -0.0016 & -0.0004 & 0.0016 & -0.0002 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

最终的色彩还原效果如图 9 所示。

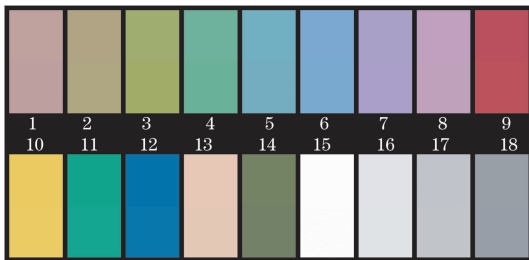


图 9 18 种原始色彩和使用改进变换得到的测得色彩的比较(上半部分为原始色彩,下半部分为测得色彩)  
Fig.9 Comparison of the 18 original and the measured colors using improved transform (the upper for original color and bottom for measured color)

可以看到,简单的线性变换其实是它的一种低阶形式。需要注意的是,虽然使用高阶的回归能得到效果极佳色彩准确度,但是转换矩阵将对输入列向量中的噪声极为敏感,一点点噪声就将让输出完全偏离正确结果,而实际得到的数据总是或多或少存在噪声的,所以直接应用这个方法在实际应用中得到的效果不佳。

图 10 为没有考虑噪声的情况下应用直接求解得到的变换矩阵  $M$  进行色彩还原,输入信号中加入 5% 噪声的效果,可以看到虽然在输入信号中存在 5% 的噪声,但是实际获得的还原色彩中的色彩误差

影响非常大,说明得到的变换矩阵  $M$  中具有对噪声的病态响应。

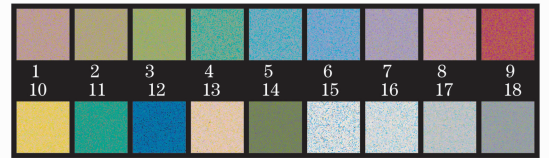


图 10 对没有考虑噪声影响的二阶多项式变换的各通道加入 5% 的高斯噪声后的还原效果  
Fig.10 Results of two-order polynomial transform (without consideration of the noise influence) with each channel imposed 5% Gaussian noise

这里提出一种改进的带有噪声的回归方法,即在拟合过程中给输入量中加入噪声以后进行多次拟合得到多个变换矩阵  $M$ ,再取  $M$  的均值。这样有效的去除了  $M$  对噪声的敏感性。根据实验效果,在取 1000 次以上的  $M$  样本进行均值处理以后,基本上消除了对噪声的病态响应。图 11 为对各通道响应加入 5% 高斯噪声以后的系统还原色彩效果。

可以看到二阶多项式拟合能提供的效果已经十分理想,基本上只有仔细分辨才可以看出个别色彩的差异。把色彩转换到 CIE  $L^* A^* B^*$  空间,计算复原色彩和原色彩的误差,平均误差  $E_{ab} = 2.37$ ,均方差为  $\sigma E_{ab} = 1.66$ ,最大误差  $E_{ab\_max} = 5.83$ (文献[20])

给出的 SONY 的一款 CCD 的色彩误差: 平均误差  $E_{ab} = 4.90$ , 均方差  $\sigma E_{ab} = 3.97$ , 最大误差  $E_{ab\_max} = 20.23$ 。

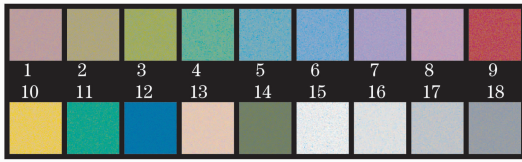


图 11 对考虑噪声影响的二阶多项式变换的各通道加入 5% 的高斯噪声后的还原效果

Fig. 11 Results of two-order polynomial transform (with consideration of the noise influence) with each channel imposed 5% Gaussian noise

## 5 结 论

对一种基于两层垂直层叠结构和二色滤色片的色彩传感器的色彩特性及其还原方法进行了理论分析和实验研究。由于本传感器兼容于标准 CMOS 工艺, 它可以被应用在 CMOS 图像传感器的像素中。进行了色彩还原性的实验, 应用了一种基于多个多项式回归方法, 并对该方法加以改进以提高鲁棒性。结果表明该器件能够提供令人满意的色彩还原效果, 相对于只应用常用的简单线性转换的平均色彩误差  $E_{ab} = 6.88$ , 均方差  $\sigma E_{ab} = 9.78$ , 同时最大误差  $E_{ab\_max} = 40.12$ , 在二阶回归的后平均误差  $E_{ab} = 2.37$ , 均方差为  $\sigma E_{ab} = 1.66$ , 最大误差  $E_{ab\_max} = 5.8$ , 甚至优于商用 CCD。

## 参 考 文 献

- 1 Xu Zhihai, Li Qi. *Modern Imaging Systems* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001, 67  
徐之海, 李 奇. 现代成像系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001
- 2 S. Mohajezadeh, A. Nathan, C. R. Selvakumar. Numerical simulation of a p-n-p-n color sensor for simultaneous color detection[J]. *Sensors and Actuators A*, 1994, **44**:119~124
- 3 David L. Gilblom, Sang Keun Yoo, Peter Ventura. Real-time color imaging with a CMOS sensor having stacked photodiodes [C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5210**:105~115
- 4 M. Sedjil, G. N. Lu, M. Ben Chouikha *et al.*. Modeling of BDJ and BTJ structures for color detection[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3680**:388~397

- 5 G. N. Lu, M. Ben Chouikha, G. Sou *et al.*. Color detection using a buried double p-n junction structure implemented in the CMOS process[J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(6):594~596
- 6 M. Ben Chouikha, G. N. Lu, M. Sedjil *et al.*. Color detection using a buried triple p-n junction structure implemented in a BiCMOS process[J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(1):120~122
- 7 D. Knipp, H. Stiebig, H. Wagner. Thin film color sensors in multi-channel technology[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4306**:156~157
- 8 D. Knipp, R. A. Street, H. Stiebig *et al.*. Vertically integrated thin film color sensor arrays for imaging applications[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(8): 3106
- 9 K. M. Findlater, D. Renshaw, J. E. D. Hurwitz *et al.*. A CMOS sensor employing a double junction photodiode[C]. 2001 *IEEE Workshop on Charge-Coupled Devices and Advanced Image Sensors*, *IEEE Electron Devices Society*, 2001, **60**
- 10 K. M. Findlater, D. Renshaw, J. E. D. Hurwitz *et al.*. A CMOS image sensor with a double-junction active pixel[J]. *IEEE Transaction on Electron Devices*, 2003, **50**(1):32~42
- 11 Chen Yuan, Xu Zhihai, Feng Huajun. Multispectral color sensor based on vertical stacked structure [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, **27**(5):837~841  
陈 远, 徐之海, 冯华君. 基于垂直层叠结构的多光谱彩色传感器[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, **27**(5):837~841
- 12 Chen Yuan, Xu Zhihai, Feng Huajun. Visible/Near IR double wave band sensor based on vertically stacked structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6):1018~1022  
陈 远, 徐之海, 冯华君. 基于垂直层叠结构的可见/近红外双波段传感器研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6):1018~1022
- 13 David L. Gilblom, Snag Keun Yoo. Infrared and ultraviolet imaging with a CMOS sensor having layered photodiodes[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5301**:186~192
- 14 David L. Gilblom, Snag Keun Yoo. Infrared and ultraviolet imaging with a CMOS sensor having layered photodiodes[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5301**:186~192
- 15 Michael H. Jones, Stephen H. Jones. Optical properties of silicon[R]. Virginia Semiconductors, Inc.
- 16 Ji Soo Lee, Richard I. Hornsey, David Renshaw. Analysis of CMOS photodiodes-Part I: quantum efficiency [J]. *IEEE Transaction on Electron Devices*, 2003, **30**(5):1233~1238
- 17 M. Ben Chouikha, F. Viénot, G. N. Lu. Colorimetric characterization of a buried triple p-n junction photodetector[J]. *Displays*, 1998, **19**:105~110
- 18 T. Johnson. Methods for characterizing color scanners and digital cameras[J]. *Display*, 1996, **16**(4):183~191
- 19 Patrick G. Herzog, Dietmar Knipp, Helmut Stiebig *et al.*. Characterization of novel three and six channel color moiré free sensors [C]. *IS&T/SPIE Conference on Color Imaging: Device-Independent Color. Color Hardcopy and Graphic Arts IV*, *SPIE*, 1999, **3468**:48~59
- 20 D. Knipp, P. G. Herzog, H. Stiebig. Multi-channel sensors with reduced metameric errors[J]. *J. Non-Crystalline Solids*, 2000, **266~269**:1158~1162