

一种新型两层垂直层叠结构的 CMOS 彩色传感器

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: 本文研究了一种基于两层垂直层叠结构的新型 CMOS 色彩传感器,该器件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,实现彩色成像.由于该器件研制完全兼容于标准 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.它的基本原理是利用不同波长的光在硅材料中穿透深度的非线性分布,即:短波长的偏蓝可见光主要在表面被吸收,长波长的偏红光则主要在更深的位置被吸收.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.经过数值仿真和实验测试表明,该传感器可以提供色彩信息,并且可以作为像素结构应用在 CMOS 图像传感器上,具有较大的实际意义.

关键词: 彩色成像;色彩传感器;CMOS 成像传感器;垂直层叠结构

中图分类号: TN36 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 05-0970-05

A Vertical Integrated Diode for CMOS Color Image Sensor

CHEN Yuan, XU Zhi-hai, FENG Hua-jun

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

Abstract: The vertical integrated diode can sense blue and red illumination simultaneously, it can provide full color information with green/magenta filter on it. It can also be the pixel of the CMOS image sensor for its fully compatible with standard CMOS process. Its basic principle is to use the silicon's differences of penetration depths of electromagnetic waves with different wavelengths, i. e., blue light with short wavelength is absorbed mainly at surface while red light with longer wavelength is absorbed deeper. Through extraction of photogenerated carrier at different depth by vertical integrated diode with two color filters, we get the full color image. The numerical simulation and the experimental device show that it can provide color information and can be applied in CMOS image sensor pixel design.

Key words: color imaging; color sensor; CMOS image sensor; vertically integrated diode

1 引言

传统的基于半导体的图像传感器(CCD, CMOS image sensor)本身没有色彩感知能力,它的彩色图像传感能力来自于CFA(Color Filter Array)^[1],即通过一定模式(如最常见的Bayer pattern)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.这种方法具有很好的优点,它的RGB三种通道响应曲线分立可以做到非常完美,因此获得的图像色彩还原度极佳;同时由于每个像素只需要读取一个信号值,大大简化了传感器阵列的读出电路设计和布局布线.它的缺点同样突出:(1)由于三通道的采样点数比例不同,造成它们在各个方向上的采样频率不同,一旦图像的高频部分超乃奎斯特频率发生失真,将出现非常明显的彩色摩尔条纹.为了消除这个效应,普通的传感

器前必须加一块光学低通滤波器消除高频部分,由此势必带来系统成本上升和图像高频细节损失;(2)随着市场对图像传感器像素的渴求,现在带有一千万像素消费级DC已经不鲜见.但是这个一千万是指彩色插值以后的,也就是虽有那么多的像素,但并不是每个像素上的RGB三通道的值都是真实的.如果可以做到每一个像素有能力同时感三色光,那么可以大大减轻像素提高对工艺最小线宽和面积的要求;(3)采用CFA的彩色图像传感器光能率用率低,进入光学系统的光能量有2/3被浪费.

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^[2-7],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三通道的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

收稿日期:2008-07-26;修回日期:2008-10-28

基金项目:国家自然科学基金(No. 60577047)

的色彩失真,2002 年美国 Foveon 公司推出了基于垂直层叠结构的 X3[®] CMOS 彩色图像传感器,已经成功地应用在日本 Sigma 公司的数码单反照相机 SD9,SD10 上.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^[5],再转换到 RGB 三通道色彩响应.这样一方面使之与标准 CMOS 工艺兼容,另一方面通过滤光片的应用提高了各通道的色彩分离性能,同时由于二色滤光片的空间采样频率相同,减轻了彩色摩尔条纹的现象.本文研究的就是这种新型的垂直层叠结构配合简化的滤光片阵列进行彩色成像的器件.

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,长波长的近红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^[8]提供了可能.图 1 为红(650nm),绿(550nm),蓝(450nm)三种颜色的单色光在硅体内沿深度方向的光生载流子产生率.

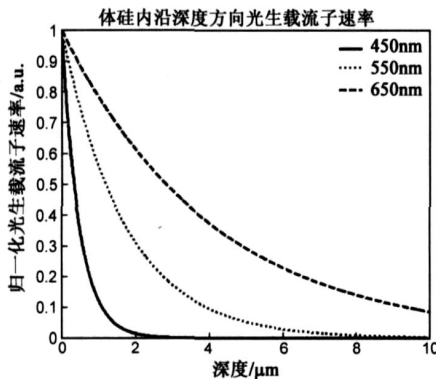


图1 RGB单色光在硅内部的归一化光生少数载流子产生率

图 2 是器件的结构和能带示意图.使用了标准 N 阱 CMOS 工艺内具有的 P⁺/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⁺ 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⁺/N 阱结附近区域被吸收,在该区域产生的电子空穴对电场的作用下分离,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⁺ 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(这里主要考虑漂移电流).因此, I₁ 主要包含蓝绿波段信息, I₂ 同时包含偏红波段和偏蓝绿波段信息.

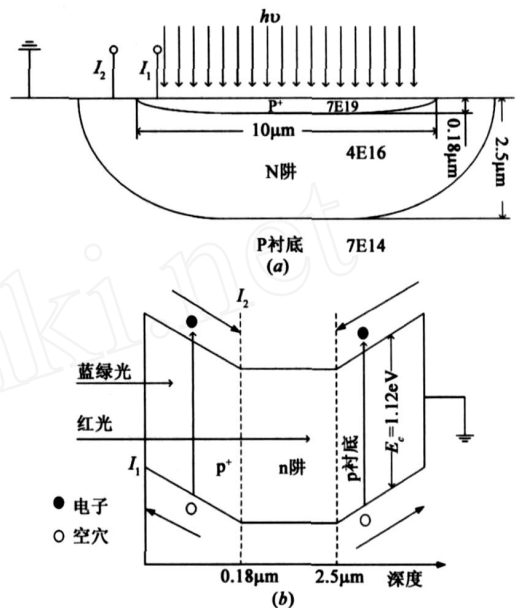


图2 (a)器件结构剖面示意图; (b)器件表面至衬底的能带示意图

3 数值仿真和结果

对于尺寸在深亚微米以上的半导体器件来说,应用迁移-扩散(Drift-Diffusion)电流模型来描述内部载流子输运过程是足够精确的.通过数值方法求解二维电子空穴连续性方程和泊松方程,可以完备地确定被仿

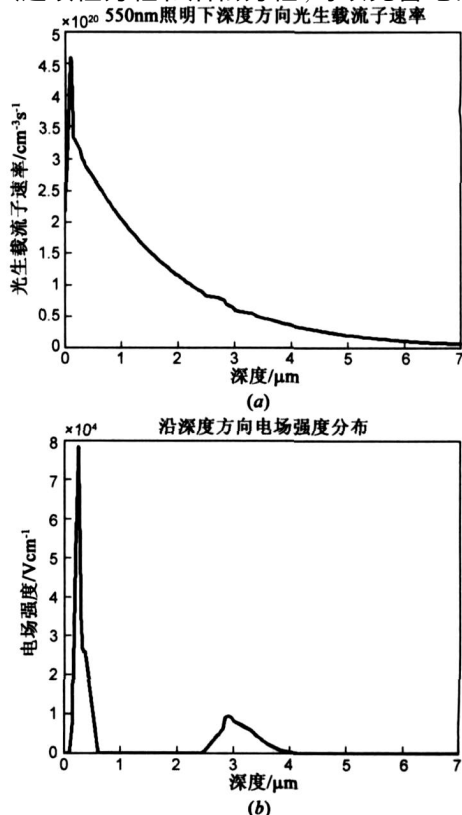


图3 在550nm单色光照明下 (a)沿深度方向的光生载流子产生率; (b)沿深度方向器件内部的电场强度分布

真结构的电学特性. 在仿真有光入射的器件的情况下, 电子空穴的连续性方程中的产生项将包括光生载流子.

模拟的器件结构设置为:光源为 $1e17$ 光子/ cm^2s , 波长 $380 \sim 780nm$,宽度为 $10\mu m$ 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^+ 区域掺杂浓度 $7E19cm^{-3}$, N 阱区域掺杂浓度 $4E16cm^{-3}$, P 衬底掺杂浓度 $7E14cm^{-3}$; P^+/N 阱节深 $0.18\mu m$, N 阱/ P 衬底节深 $2.5\mu m$.为了减少总的仿真格点数加快仿真速度,取 P 衬底厚度为 $80\mu m$.同时由工艺的布局规则文档,使用最小的 $0.6\mu m$ 大小的 contact,contact 最小距离 P^+/N 阱边缘分别为 $0.4\mu m$ 和 $0.8\mu m$, P^+ 和 N 阱最小距离 $1.8\mu m$;在满足这些条件下选择 P^+ 区域横向尺寸为 $10\mu m$, N 阱区域横向尺寸为 $14\mu m$.偏置电压为 $V_1 = V_2 = 0V$,即仿真结短路电流,具体结构见图 2.使用的器件仿真器为 Taurus Medici.

图 3 是在 $550nm$ 波长照明下,沿深度方向的光生载流子产生率和器件内部的电势分布的模拟结果.

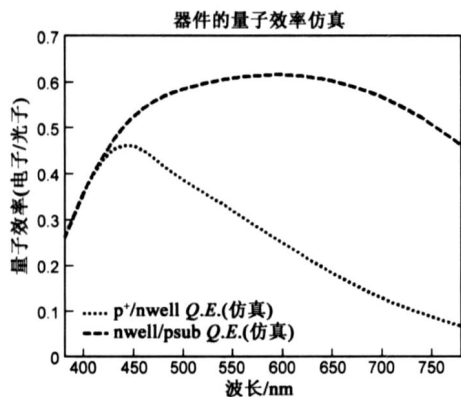


图4 仿真得到的垂直层叠结构器件的量子效率

图 4 为得到的垂直层叠二极管的量子效率曲线,它与实测结果有较好的吻合度(具体见实验结果和分析).可以看到 N 阱/ P 衬底结的响应比 P^+/N 阱结大很多,这是因为这个结的响应电流为 I_1 和 I_2 之和.

4 实验结果和分析

我们在 CSMC 0.6 μm 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.器件内部(图 5)包含了 9 个并联的两层层叠光电二极管,每个尺寸为 $500 \times 500\mu m^2$.

器件量子效率测量通过两个步骤完成:首先,通过光栅干涉单色仪对卤钨灯光源进行分色得到单色光,并通过绝对辐射计对单色光功率进行标定,然后通过测量不同波长单色光照明下的器件光电流输出并根据

量子效率的计算公式:

$$QE = \frac{I_{ph}hc}{qP}$$

即可计算得到器件的量子效率.

测量得到的两层层叠光电二极管的量子效率曲线如图 6

可以观察到, P^+/N 阱结的响应主要集中在 $550nm$ 之前,也就是对蓝绿光具有较强的响应.而 N 阱/ P 衬底结的响应更加偏向于 $600nm$ 以上的偏红色光,但是同时它也包含了蓝绿光的响应,这与前一

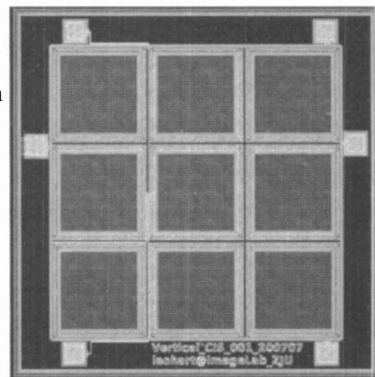


图5 器件的版图

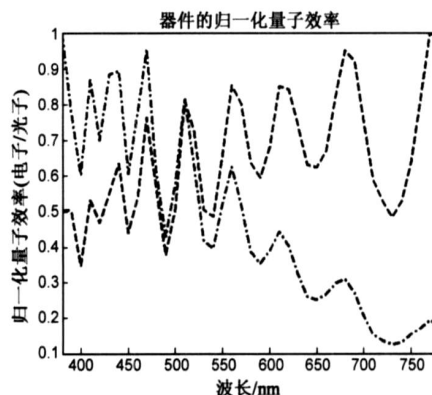


图6 实测得到的器件量子效率

段 I_2 电流成分的分析相符.

另外,与图 4 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 SiN 和 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,可以通过一定厚度的 SiO_2 薄膜近似.带有干涉效应的反射率公式为^[9]:

$$T(\lambda) = 1 - \frac{n_{SiO_2}^2 (n_{air} - n_{Si})^2 \cos^2(2p) + (n_{air} n_{Si} - n_{SiO_2}^2)^2 \sin^2(2p)}{n_{SiO_2}^2 (n_{air} + n_{Si})^2 \cos^2(2p) + (n_{air} n_{Si} + n_{SiO_2}^2)^2 \sin^2(2p)}$$

其中:

$$p = n_{SiO_2} \times t_{ox} \times \cos \theta$$

工艺文档上给出的覆盖在扩散区上的钝化层厚度为 $2.05\mu m$,通过与实测曲线比对(图 7),在计入 $2\mu m$ 厚度的单层非晶 SiO_2 的干涉效应以后,仿真得到的量子

效率曲线跟实测有了较好的吻合. 仍剩下的一定的偏离主要是因为我们的数值仿真是基于对于实际工艺参数的估计上进行的, 因此存在一定的误差是合理的, 而且数值仿真已经完全体现本器件的最重要的性能曲线的主体趋势.

在短波端的偏离主要是因为实测时此波段的光源强度非常小, 可以认为得到的数据很不可靠. 而在长波端数值仿真跟实测的差距产生主要的原因可能是: (1) 实际制作的 P 衬底厚度远大于仿真的 80 μm , 大约在 500 μm ; (2) 仿真使用的扩散长度过小, 损失了不少扩散电流. 这点通过文献[9]的建议, 可以通过使用半经验的扩散长度参数来进行拟合得到精确结果.

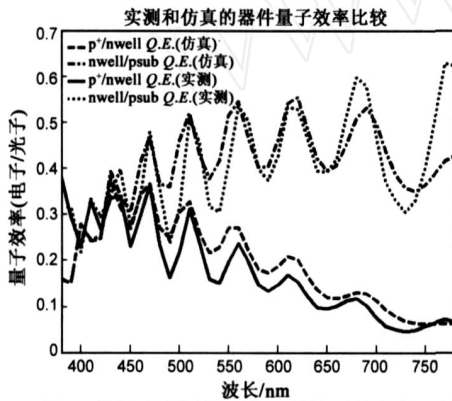


图7 模拟和实测得到的器件量子效率的比较

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, 我们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 650nm 以上的红光有很强的响应, 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 650nm 以上波长光进行截止的 IRCUT 滤色片.

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见图 8:

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⁺/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⁺/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^[10].

这个变换可以用矩阵运算表达为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = [M] \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix}$$

其中

$$X = k \int_{380}^{780} \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad I_1 = C \int_{380}^{780} QE_1(\lambda) d\lambda$$

$$Y = k \int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad I_2 = C \int_{380}^{780} QE_2(\lambda) d\lambda$$

$$Z = k \int_{380}^{780} \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad I_3 = C \int_{380}^{780} QE_3(\lambda) d\lambda$$

$$I_4 = C \int_{380}^{780} QE_4(\lambda) d\lambda$$

$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ 是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, 也就是我们能得到转换输入值.

通过对 CIE 推荐的 14 种色彩和 4 种灰度进行拟合得到色彩变换矩阵, 最终的色彩还原效果见图 9:

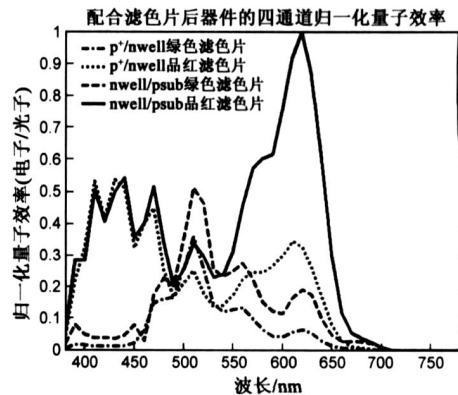


图8 实测得到配合二色滤色片以后的器件得到的4通道响应的量子效率

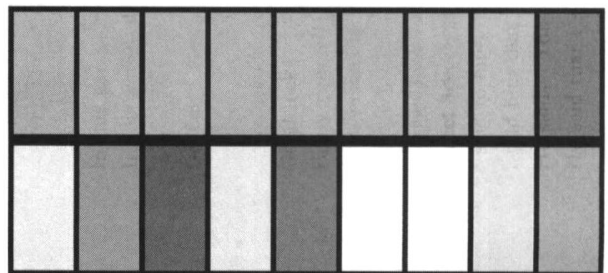


图9 18种原始色彩和测得色彩的比较(每种色彩的上半部分为原始色彩, 下半部分为测得色彩)

可以看到效果十分理想,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 $E_{ab} = 1.66$,最大误差 $E_{ab, max} = 5.83$ (文献[11]给出的 SONY 的一款 CCD 的色彩误差:平均误差 $E_{ab} = 4.90$,均方差 $E_{ab} = 3.97$,最大误差 $E_{ab, max} = 20.23$).

5 结论

本文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进行了理论性和实验性研究.为器件构建了一个准确数值仿真模型,方便对器件结构和性能进行优化设计,结果表明理论仿真建模和实测数据有较好的一致性.同时,我们进行了色彩还原性的实验,结果表面该器件能够提供令人满意的色彩还原效果,色彩误差仅为 $E_{ab} = 2.92$,甚至优于商用 CCD.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.

参考文献:

- [1] 徐之海,李奇.现代成像系统[M].北京:国防工业出版社,2001.63 - 64.
- [2] Gilblom D L, et al. Proceedings of SPIE, 5210[C]. Washington:SPIE,2004.105 - 110.
- [3] Lu G N, 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.
- [4] Chouikha M B, 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.
- [5] Findlater K M, et al. A CMOS image sensor with a double-junction active pixel[J]. IEEE Trans. Electron Devices, 2003, 50(1): 32 - 42.
- [6] 陈远,等.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.

Chen Yuan, et al. Multispectral Color Sensor Based On Vertical Stacked Structure [J]. Spectrosc. Spect. Anal., 2007, 27(5): 837 - 841. (in Chinese)

- [7] 陈远,等.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.

Chen Yuan, et al. Visible/ Near IR double wave band sensor based on vertically stacked structure [J]. Acta Opt. Sinica, 2007, 27(6): 1018 - 1022. (in Chinese)

- [8] Gilblom D L, et al. Proceedings of SPIE, 5301[C]. Washington:SPIE,2004.186 - 192.
- [9] Lee J S, et al. Analysis of CMOS photodiodes-Part I: quantum efficiency[J]. IEEE Trans. Electron Devices, 2003, 30(5): 1233 - 1238.
- [10] Chouikha M B, et al. Colorimetric characterization of a buried triple p-n junction photodetector[J]. Displays, 1998, 19: 105 - 110.
- [11] Knipp D, et al. Multi-channel sensors with reduced metameric errors[J]. J. Non-Cryst. Solids, 2000, 266-269: 1158 - 1162.

作者简介:



陈远 男,宁波人,浙江大学光电系在读博士研究生,研究方向为 CMOS 图像传感器像素结构和模拟读出前端电路.
E-mail:cy@zju.edu.cn



徐之海 男,博士,杭州人,浙江大学光电系教授、博导,主要从事空间相机和图像传感器方面的研究.通讯作者 E-mail:xuzh@zju.edu.cn