

用于视觉假体的新型高动态范围图像 传感器像素单元电路设计

隋晓红¹, 高 勇², 赵阶喜^{1,2}, 杨 媛², 任秋实³

(1. 上海交通大学生物医学工程学院, 上海 200240; 2. 西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西西安 710048;
3. 北京大学工学院, 北京 100871)

摘 要: 针对于视觉假体的应用领域, 本文提出了一种新型的高动态范围的 CMOS 图像传感器 (CMOS Image Sensor, CIS) 像素单元电路. 该电路采用了列共用单元的条件溢出电容和多次积分技术, 大大提高了图像传感器的动态范围, 同时使其在低光照时保持较高的灵敏度和信噪比. 采用了特许半导体公司的 0.35 μm CMOS 工艺参数对该电路进行了仿真, 结果表明所设计的电路比普通四晶体管有源像素传感器 (4 Transistor Active Pixel Sensor, 4T APS) 电路的动态范围提高了约 62dB, 并且在低光照时保持了普通 4T APS 的高信噪比和灵敏度的特点.

关键词: 视觉假体; 图像传感器; 高动态范围; 条件溢出电容

中图分类号: TN492 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 08-1800-05

Circuit Design of High-Dynamic-Range Image Sensor Pixel for Visual Prostheses

SUI Xiao-hong¹, GAO Yong², ZHAO Jie-xi^{1,2}, YANG Yuan², REN Qiu-shi³

(1. School of Biomedical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

3. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: A novel pixel circuit of high dynamic range CMOS image sensor (CIS) was presented for the applications of visual prosthesis, which used the conditional overflow capacitors and multiple integration technologies to achieve high dynamic range, high sensitivity and high signal to noise ratio (SNR) requirements. The designed circuit was simulated using Chartered Semiconductor 0.35 μm CMOS process model parameters, the simulating results showed that the dynamic range was increased by about 62dB than the traditional 4 Transistor Active Pixel Sensor (4T APS) circuit, and the SNR and sensitivity were as high as the 4T APS in weak signal conditions.

Key words: visual prosthesis; CMOS image sensor; dynamic range; conditions overflow capacitors

1 引言

目前世界上有超过 4000 万的盲人, 使用视觉假体可以使盲人在一定程度上识别外界事物, 视觉假体的主要电学机理是: 由图像传感器采集到的外界图像信息, 经信号处理器进行图像处理, 通过无线发射模块传输给植入人眼的接收模块和微电流刺激器, 对视觉通路中的视网膜、视神经或视皮层等部位进行电刺激, 以使盲人感受到相应的图像信息^[1]. 目前在各种不同视觉假体的临床实验中, 采用的微电极阵列的电极数量一般少于

100 个^[2], 受试者能够产生光感、辨认简单物体与字符. 如果要使盲人能够利用视觉假体进行书刊阅读或辨认复杂物体, 则需要 600 到 1000 个电极的微电极阵列^[1]. 考虑到盲人使用视觉假体的美观性以及获取图像的实时性, 可将图像采集系统植入到眼球内部, 实现全植入式视觉假体. 这种植入式图像采集系统由植入眼球的低像素图像传感器^[3,4]获取外界信息, 无需经过进一步的图像处理, 便将图像信息传输给微电流刺激器, 进而通过微电极阵列对视网膜、视神经或视皮层等部位进行电刺激, 在盲人的视皮层区域产生光幻视. 由于微电极阵

列的电极个数有限,而商用的图像传感器的像素个数远远超出视觉假体的要求,所以需要进行轮廓或边缘提取等图像处理,这增加了视觉假体的体积和功耗.对于全植入式视觉假体而言,可植入的电极个数决定了盲人能接受到的图像的最大像素数,从降低功耗和减小面积的需求考虑,适宜采用面积小、功耗低的低像素 CMOS 图像传感器^[5,6](CMOS Image Sensor: CIS)来采集图像信息,并且要求 CIS 的像素单元电路具有较高的动态范围,这对于全植入式视觉假体的研究是非常有意义的.

动态范围是 CMOS 图像传感器的一个重要性能参数,定义为最大非饱和信号和最小可测信号的比值.提高 CMOS 图像传感器动态范围的方法主要有条件复位技术^[7]、对数响应技术^[8]、势阱电容调节技术^[9]、多次采样技术^[10]等,这些方法各有优缺点.本文结合视觉假体的应用需求,设计了一种新型高动态范围、高信噪比、低功耗的 CMOS 图像传感器像素单元电路,采用了列共用的条件溢出电容和多次积分的方法,大大提高了图像传感器的动态范围,并保证了图像传感器在低光照时的信噪比和灵敏度.像素单元(32H×32V)1024 个,单个 pixel 面积为 25μm×25μm,感光单元面积为 20μm×20μm,帧频 30fps.并采用 cadence 软件对所设计的电路进行了仿真测试,仿真中采用了特许半导体 0.35μm 的 CMOS 模型工艺参数.

2 像素阵列的设计

像素阵列的设计是 CIS 设计的一个重要组成部分,其设计结果直接关系到后面的信号处理后的图像质量,根据视觉假体的需要,所设计的图像传感器像素阵列的结构如图 1 所示,它包含 32×32 个像素单元及 32 个列共用单元(column shared unit),时序上采用逐行曝光技术.每列像素单元输出的图像信号传输到每列对应的差分双采样(CDS)电路,以减小像素单元产生的固定模式噪声信号,然后经可编程放大(PGA)和模数转换(ADC)后,输出数字信号.

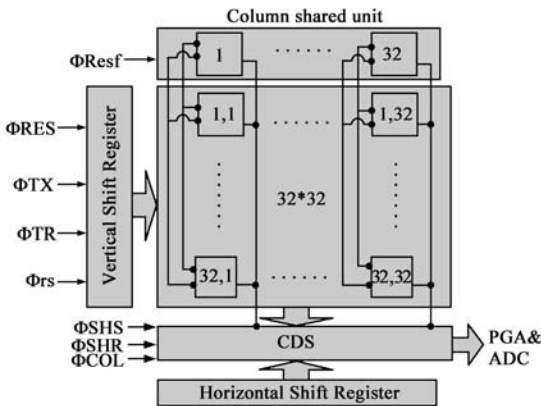


图1 CIS像素阵列结构图

像素单元电路与列共用单元电路如图 2 所示.在像素单元电路中,PM1 是复位晶体管, NM1 为源跟随放大晶体管、NM2 为行选晶体管, NM3 为传输门晶体管, NM4、NM5、PM5 为光电二极管 D_0 积累的电荷向电容 C_F 溢出的控制开关,其中 V_F 为 2.2V, V_{CC} 为 3.3V.列共用模块由条件溢出电容 C_F 、复位开关 NM7、NM11、光电二极管溢出控制开关 PM5 及电压比较器单元电路构成,比较器的输出信号通过控制 PM5 的导通状态来决定电容 C_F 和光电二极管之间是否发生电荷转移. NM4 和 NM5 由比较选通信号 TR 控制,哪一行的 pixel 单元中 TR 为高电平,则该行使用列共用单元,此时其他行 TR 为低电平.列复位信号 Resf 控制开关晶体管 NM7、NM11,在每行开始使用列共用单元前对电容 C_F 及电压比较器输入输出端进行复位,使 PM5 初始状态处于截止状态.

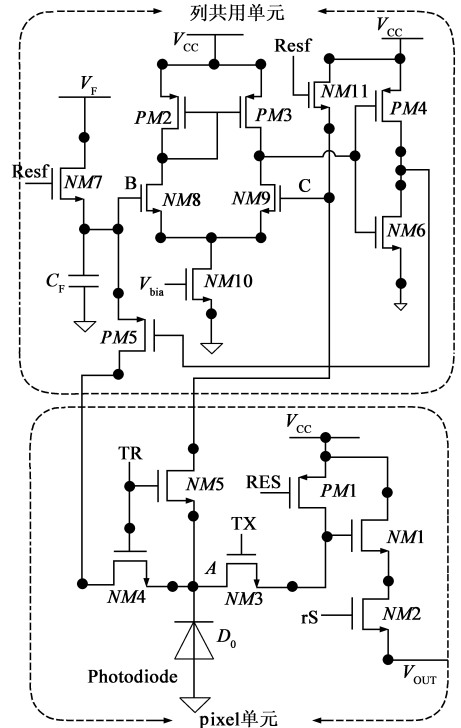


图2 pixel单元和列共用单元电路

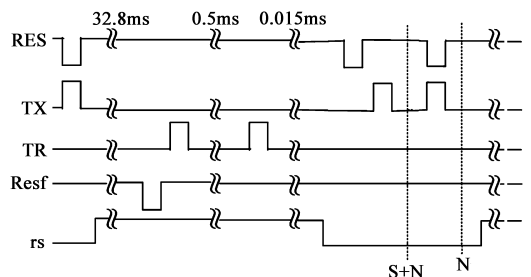


图3 电路时序结构图

3 电路的时序结构与功能分析

电路时序如图 3 所示, 电路中包括光电二极管复位信号 RES、传输门晶体管控制信号 TX, 行条件复位选通信号 TR, 行选信号 rs, 列共用单元复位信号 Resf. 每个周期 (33.3333ms) 有三次积分时间: 长积分时间 t_1 (32.8ms)、中积分时间 t_2 (0.5ms)、短积分时间 t_3 (0.03ms). 在长积分时间开始前, 先对光电二极管进行复位, 使其处于反向偏置状态, 在有光照时, 光电二极管的反向电压在积分时间内逐渐减小, 其电压下降速度可近似认为与光照强度成正比, 在长积分时间 t_1 结束时, 该像素单元需要使用列共用模块, 此时, Resf 控制列共用模块复位, 电容 C_F 和电压比较器两输入端同时被复位, 由于 $V_F < V_{CC}$, 电压比较器同相端复位电压大于反相端, 输出信号为高电位, PM5 截止, 接着 TR 为高电位, 使 NM4、NM5 导通, 由光电二极管和电容 C_F 的电压大小来决定光电二极管是否向电容 C_F 溢出部分因光照积累的电荷, 若 $V_{PD} > V_{CF}$, 则电压比较器输出电压为高电位, PM5 保持截止状态; 若 $V_{PD} < V_{CF}$, 则 PM5 导通, 光电二极管向电容 C_F 溢出部分由于光照积累的电荷, 此时光电二极管的电压变为:

$$V_{PD} \approx \begin{cases} V_{PD}, & V_{PD} > V_{CF} \\ (V_{PD} * C_{pd} + V_{CF} * C_F) / (C_F + C_{pd}), & V_{PD} < V_{CF} \end{cases} \quad (1)$$

由上式可知, 当 $V_{PD} < V_{CF}$ 时, 电容 C_F 越大, V_{PD} 与 V_{pd} 越接近, 即图像信号随光强变化的曲线被压缩的越厉害, 有利于提高图像的动态范围, 同时大电容所占用的版图面积也随之增加, 文中 C_F 的电容为 500fF. 在中积分时间结束时, T_R 再次为高电位, NM4、NM5 导通, 再次使用列共用模块, 光电二极管和电容 C_F 通过电压比较器进行电压比较, 结果同长积分时间结束时的情况, 此时光电二极管的电压变化由式(1)可知. 在短积分时间结束时, 对 pixel 单元采集的图像信号进行读取, 不再使用列共用模块, 光电二极管的电压信号通过源跟随放大晶体管 NM1 被读取到后续的采样保持电容 CS 中 (Signal + Noise), 然后 PM1 和 NM3 同时导通, 对光电二极管进

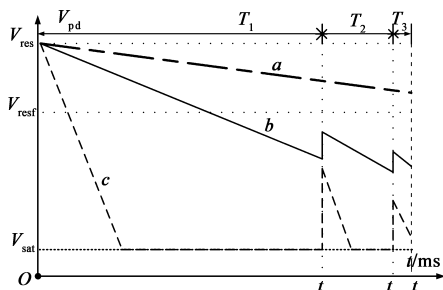


图4 光电二极管的反偏电压随积分时间变化曲线

行复位, 读取复位后的噪声信号 (Noise) 到采样保持电容 CN 中, 然后经差分电路去除噪声信号, 这里的噪声信号主要为 pixel 单元的固定模式噪声.

在一个周期时间内, 光电二极管的反偏电压随光照强度变化曲线如图 4 所示, 在低光照时, 光电二极管在积分时间内, 反偏电压 V_{pd} 仍大于电容 C_F 的电压 V_{CF} , NM6 不导通, 光电二极管与条件溢出电容 C_F 不发生电荷转移, 如图 4(a) 所示, 此时光电二极管在短积分时间 T_3 结束时的电压为 V_3 (忽略其他噪声的影响):

$$V_3 \approx V_{res} - \frac{(I_{ph} + I_{dark}) * (t_1 + t_2 + t_3)}{C_{pd}} \quad (2)$$

在较强光照情况下, 长、中积分时间 T_1 结束时, V_{pd} 低于 V_{CF} , 如图 4(b)、(c) 所示, 光电二极管上积累的电荷 (负电荷) 向电容 C_F 溢出一部分, 中积分时间结束时, 均与电容 C_F 发生电荷转移. 在短积分时间结束时, 光电二极管的电压直接被读出, 忽略暗电流外的其他一些噪声信号的影响, 有:

$$V_i \approx \begin{cases} V_{i0} - \frac{(I_{ph} + I_{dark}) * T_i}{C_{pd}}, & V_{PD} > V_{sat} \\ V_{sat}, & V_{PD} = V_{sat} \end{cases} \quad (\text{其中 } i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

其中, V_{i0} 、 V_i ($i = 1, 2, 3$) 分别为光电二极管在 T_i 积分时间开始和结束时的电压值, V_{res} 为光电二极管的复位电压, V_{sat} 光电二极管饱和时的电压. V_{i0} 的值由式(4) ~ (6) 可知:

$$V_{i0} \approx V_{res} \quad (4)$$

$$V_{20} \approx (V_1 * C_{pd} + V_{CF} * C_F) / (C_F + C_{pd}) \quad (5)$$

$$V_{30} \approx (V_2 * C_{pd} + V_{CF} * C_F) / (C_F + C_{pd}) \quad (6)$$

4 高动态范围、高灵敏度分析

光电二极管在一定光照时, 会产生光电流 I_{ph} , 光电流的大小与光照强度成正比, 光电二极管在达到饱和前, 因光照积累的电荷量为 $Q = (I_{ph} + I_{dark}) * t$, 其中 t 为积分时间, I_{dark} 为光电二极管的暗电流噪声信号, 当光电流小于暗电流时, 光照产生的电荷和暗电流很难区分开, 暗电流限制了图像传感器的灵敏度和动态范围. 在下面的分析中, 图 5 为三种不同结构的图像传感器像素单元读出电压信号和光照强度的变化曲线. 假定三种结构均使用了 4T 有源图像传感器结构, 在工艺上采用相同的工艺技术, 为方便进行比较, 可近似认为三种结构的暗电流噪声 I_{dark} 相同. 对于普通 4T 结构的有源图像传感器, 其 pixel 单元由源跟随放大晶体管 NM1、行选晶体管 NM2、传输门晶体管 NM3、复位晶体管 PM1 及光电二极管构成, 其动态范围较低, 读出电压信号大小与光照强度成线性关系, 如图 5(a) 所示, 由于

暗电流等噪声的影响,光电二极管在低光照时,光照积分时间内积累的电荷大于暗电流噪声信号产生的电荷时才能被有效地读出,其动态范围可以表示为: $DR_a \approx 20\log E_3/E_1$. APS 电路中可采用横向溢出积分电容来提高图像传感器的动态范围,对读出信号随光照强度变化的曲线进行压缩,其曲线的变化趋势大致如图 5(b)所示,在低光照时图像传感器的灵敏度和信噪比较低,假定其暗电流噪声大小也为 V_{dark} ,光强大于 E_2 时图像信息才能被识别,动态范围约为: $DR_b \approx 20\log E_4/E_2$. 本文所设计的电路读出电压信号和光照强度的曲线如图 5(c)所示,在低光照时,不对采集的图像信号进行压缩,像素单元的读出电压信号和普通 4T APS 基本相同,这就保证了图像传感器在低光照时保持了普通 4T APS 结构的灵敏度和信噪比,在较强光照时,由于条件溢出电容的作用,对采集到的图像信号进行压缩,在强光照时使其压缩比例更高,使得光电二极管的动态范围大大提高,此时 CIS 的动态范围为: $DR_c \approx 20\log E_4/E_1$,进一步提高了 CIS 的动态范围,同时保持了低光照时 CIS 较高的灵敏度和信噪比.

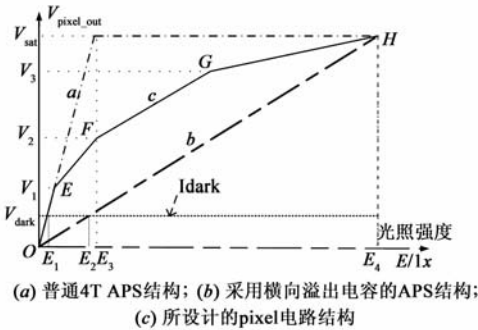


图5 CIS pixel单元读出电压和光照强度的关系曲线

5 列共用单元分析

由电路时序分析可知,每行像素单元在长积分时间结束时和中积分时间结束时需要使用列共用模块,在这两次使用列共用单元的过程中,不允许其他行使用列共用模块,因此在一个周期中,每个 PIXEL 单元要连续使用列共用单元的时间为中积分时间加上两次使用时间(小于 0.01ms),即约为 0.51ms,在每个周期内,每行均要使用列共用模块,这就要求在时序上要满足行数乘以每行使用共用模块的时间要小于周期时间 T .

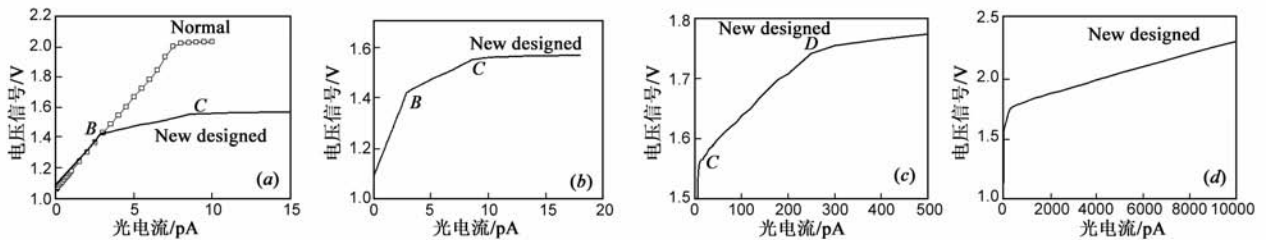


图6 电路仿真结果

本文所设计 CIS 的像素为 $32H \times 32V$, 帧频 30fps, 则每个周期为 33.333ms, 每一行的像素单元可以使用列共用模块的时间为周期除以像素行数(约为 1ms), 所以对于 $32H \times 32V$ 像素的 CIS, 每个周期内, 有足够的时间供每行分别使用列共用模块, 若像素个数较多时, 则可能没有足够的时间供每行 pixel 单元使用列共用模块, 这样就不能使用这种列共用的方式, 每个像素中均要做一个列共用模块的电路, 将会导致像素的填充系数大大降低或者面积增大.

6 结果与讨论

在不同光照时光电二极管的经差分双采样电路读出的图像信号大小的拟和曲线如图 6 所示, 图 6(a) 为普通 4T APS 结构和所设计的电路结构经差分双采样电路读出的电压信号大小随光照强度变化曲线, 由图可见, 普通 4T APS 采集到可识别的图像信号对应的光电流范围约为 $I_{ph0} \sim 8\text{pA}$, I_{ph0} 为普通 4T APS 采集到所能识别的最小图像信号对应的光电流强度 (pA), 普通 4T APS 在光电流大小达到 8pA 时, 光电二极管达到饱和状态, 其动态范围为: $DR_0 = 20\log(8/I_{ph0})$. 其中, 在低光照时, 所设计的电路和普通 4T APS 结构具有基本相同的灵敏度和高信噪比, 因此, 新设计的图像传感器所能识别的最小图像信号对应的光电流也约为 I_{ph0} . 在较强光照时, 所设计的电路采集到的图像信号大小随光照强度变化的曲线斜率降低, 以提高其动态范围. 图 6(b) ~ (d) 表示所设计的电路在不同光照时的读出信号的大小变化曲线, AB 段为低光照时, 在整个积分过程中, 光电二极管没有向条件溢出电容 C_F 溢出电荷, 其曲线变化情况和普通 4T APS 基本一致, BC 段表示光电二极管在积分时间内向条件溢出电容溢出了部分电荷, 但没有达到饱和; CD 段表示光电二极管在长积分时间结束时达到了饱和, 但在中积分时间结束时没有达到饱和, DE 段 ($270\text{pA} < I_{ph} < 10\text{nA}$) 表示光电二极管在长、中积分时间结束时均达到了饱和. 由图可见, 普通 4T APS 可识别的光信号对应的光电流小于 8pA, 而本文所设计的 PIXEL 单元带电路可识别的光信号对应的电流大小可达到 10nA, 动态范围提高了 $20\log(10000/8) \approx 62\text{dB}$. 同时在低光照时又保持了普通 4T APS 结构的相对较高的灵敏度和信噪比. 仿真结果和理论分析一致.

7 总结

本文通过对视觉假体的研究,总结出用于视觉假体的图像传感器的基本参数,在对图像传感器进行研究的基础上,针对视觉假体对图像传感器低像素、高动态范围、高灵敏度和信噪比的要求,设计了一种新型的图像传感器 pixel 单元电路. 电路中采用了列共用单元的条件溢出电容,通过比较光电二极管和条件溢出电容的电压来控制光电二极管是否向电容 C_F 溢出电荷,从而实现了高动态范围、高灵敏度和信噪比的要求,并根据特许公司 $0.35\mu\text{m}$ 工艺对电路进行了仿真,结果表明新型电路比普通 4T APS CIS 电路的动态范围大约提高了 62dB,并保持了普通 4T APS CIS 在低光照时的高灵敏度和高信噪比的特点,能够满足视觉假体要求.

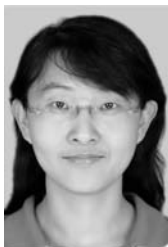
参考文献

- [1] Weiland J D, Liu W T, Humayun M S. Retinal prosthesis [J]. *Annu Rev Biomed Eng*, 2005, 7(8): 361 – 401.
- [2] Humayun M S, Weiland J D, Fujii G Y, Greenberg R, Williamson R, Little J, Mech B, Cimmarusti V, Boemel G V, Dagnelie G, Juan E D. Visual perception in a blind subject with a chronic microelectronic retinal prosthesis [J]. *Vision Research*, 2003, 43(24): 2573 – 2581.
- [3] Desouki M E, Deen M J, Fang Q Y, Liu L, Tse F, Armstrong D. CMOS image sensors for high speed applications [J]. *Sensors*, 2009, 9(1): 430 – 444.
- [4] Spivak A, Belenky A, Fish A, Pecht O Y. Wide-dynamic-range CMOS image sensors – comparative performance analysis [J]. *IEEE Trans Elec Dev*, 2009, 56(11): 2446 – 2461.
- [5] 陈敏思, 姚素英, 赵毅强, 张生才, 李树荣, 徐江涛, 王天盛. 高帧频大动态范围 CMOS 图像传感器时序控制电路的设计与实现 [J]. *电子学报*, 2004, 32(11): 1922 – 1925.
Chen M S, Yao S Y, Zhao Y Q, Zhang S C, Li S R, Xu J T, Wang T S. Timing control methods for new CMOS image sensor with high frame rate and wide dynamic range [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(11): 1922 – 1925. (in Chinese)
- [6] 陈远, 徐之海, 冯华君. 一种新型两层垂直层叠结构的 CMOS 彩色传感器 [J]. *电子学报*, 2009, 37(5): 970 – 974.
Chen Y, Xu Z H, Feng H J. A vertical integrated diode for

CMOS color image sensor [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(5): 970 – 974. (in Chinese)

- [7] Yang S H, Cho K R. High dynamic range CMOS image sensor with conditional reset [A]. *Proceedings of the IEEE Custom Integrated Circuits Conference [C]*. Orlando, FL, 2002. 265 – 268.
- [8] Storm G, Henderson R, Hurwitz J E D, Crenshaw D, Purcell M. Extended dynamic range from a combined linear-logarithmic CMOS image sensor [J]. *IEEE J Solid-State Circuits*, 2006, 41(9): 2095 – 2106.
- [9] Akahane N, Sugawa S, Adachi S, Mizobuchi K. Wide dynamic range CMOS image sensors for high quality digital camera, security, automotive and medical applications [A]. *Proceedings of 5th IEEE conference on sensors [C]*. EXCO, Daegu, Korea, 2006. 396 – 399.
- [10] Mase M, Kawahito S, Sasaki M, Wakamori Y. A wide dynamic range CMOS image sensor with multiple exposure-time signal outputs and 12-bit column-parallel cyclic A/D converters [J]. *IEEE J Solid-state Circuits*, 2005, 40(12): 2787 – 2795.

作者简介



隋晓红 女, 1980 年生于山东乳山, 博士, 讲师, 硕士生导师. 主要研究方向为生物与医学方面应用的 BioMEMS 器件与神经接口模拟集成电路设计. 先后主持国家青年自然科学基金项目 1 项, 973 二级子课题项目 2 项, 参与 863 项目 1 项. 以第一作者发表 SCI/EI 论文 13 篇, 以第一作者撰写英文专著章节 1 篇, 以第一发明人申请国内发明专利 6 项 (已授权 4 项).

E-mail: suixiang@sjtu.edu.cn



高勇 男, 1956 年生于山东宁津, 博士, 教授, 博士生导师, 西安工程大学校长, 主要研究方向为电力电子器件与功率集成、新型半导体器件与集成电路设计和超大规模集成电路设计. 担任的社会职务包括: 全国电力电子学会理事、陕西省电子学会理事、国家集成电路设计西安产业化基地专家指导委员会委员、IEEE 会员、西安理工大学微电子学与固体电子学博士点学科带头人. 承担国家或省部委 20 多项科研项目, 在国内外重要期刊发表科研论文 60 余篇, 其中 20 余篇被 SCI/EI 等检索. 先后获得多项省、部科学技术进步奖. E-mail: gaoyong@xaut.edu.cn