

# 标准 CMOS 工艺下单片集成光接收芯片的研究

陈伟, 程翔, 卞剑涛, 陈朝, 芦晶

(厦门大学 机电工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 设计与标准 CMOS 工艺兼容的 850 nm 空间调制(Spatially Modulated, SM) 结构光电探测器, 在分析器件物理模型的基础上, 建立了 SPECTRE 环境中等效电路的新模型。提出标准 CMOS 工艺下 SM 探测器与前置放大电路单片集成的电路设计。仿真结果表明, 在 850 nm 光照下, SM 探测器带宽达到 400 MHz, 并提供 62 mA/W 的响应度。整个集成芯片的工作速率为 400 Mb/s, 增益为 0.81 kV/W, 功耗为 91 mW。

**关键词:** 光电集成; CMOS; 空间调制结构; SPICE 模型; 前置放大器

**中图分类号:** TN491 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5868(2009)01-0034-04

## Monolithically Integrated Optical Receiver with Spatially Modulated Optical Detector in CMOS Technology

CHEN Wei, CHENG Xiang, BIAN Jiann tao, CHEN Chao, LU Jing  
(Dept. of Mechanical and Electrical, Xiamen University, Xiamen 361005, CHN)

**Abstract:** A monolithically integrated optical receiver ( $\lambda = 850 \text{ nm}$ ) with spatially modulated (SM) optical detector is designed in standard 0.5  $\mu\text{m}$  CMOS technology, the equivalent circuit model of the SM light detector is built in the SPECTRE environment. Simulation results show that the SM optical detector researches a bandwidth of 420 MHz and a responsibility of 78 mA/W. OEIC has a bandwidth of 400 Mb/s and gain of 0.81 kV/W with the power dissipation of 91 mW.

**Key words:** OEIC; CMOS; spatially modulation; SPICE model; preamplifier

## 0 引言

硅基 IC 工艺(Bipolar, CMOS, BiCMOS 及 SOI 等)的日渐成熟推动了硅基单片光电集成(OEIC)技术的快速发展, 其中采用相对低成本、先进成熟的 CMOS 工艺获得硅光电探测器和硅 OEIC 成为近年的一个研究热点。本文针对硅 OEIC 的一个很重要的应用领域——850 nm 甚短距离光通信中单片光接收芯片的实现展开了深入的研究。

在标准 CMOS 工艺下, 单个 pn 结探测器的 pn 结深度比硅在 850 nm 光照下的吸收长度要小得多。由于缺少电场作用, 处于深层衬底处的光生载流子

要经过纳秒甚至微秒级的延迟才能到 pn 结的空间电荷区边缘, 从而产生光生电流。正是由于这个原因, 该类结构的探测器带宽很难达到高速数据通信的要求<sup>[1]</sup>。本课题组已经成功设计了 780 nm 的  $n^+ / n \text{ Well} / p \text{ Sub}$  结构的探测器, 响应度为 0.25 A/W, 响应频率为 14.4 MHz<sup>[2]</sup>, 显然响应频率无法达到 850 nm 光通信的要求。

本文采用空间调制(Spatially Modulated, SM)结构光探测器, 通过对 SM 结构的探测器物理模型进行分析, 建立了 SPECTRE 环境下探测器的新 SPICE 等效电路模型。实现 CMSC 0.5  $\mu\text{m}$  标准 CMOS 工艺下 SM 光探测器与前置放大器的单片集成设计, 仿真结果表明, OEIC 工作速率可达 400 Mb/s。

收稿日期: 2008-04-23.

基金项目: 厦门市科技计划项目(3502Z20063002).

# 1 SM 结构光探测器

## 1.1 结构和物理模型

SM 光探测器利用在间隔的  $n^+ / \text{r Well} / \text{p Sub}$  结构探测器上采用屏蔽金属覆盖形成参考探测器, 它与实际(未被金属屏蔽)的探测器交叉。参考探测器的光电流由收集衬底部分扩散的光生载流子中的一部分形成, 从实际探测器中减掉衬底中扩散少子形成的光电流以提高探测器的速度<sup>[3]</sup>。SM 探测器结构截面图和俯视图如图 1 所示。其中屏蔽金属的指间距  $l = 14 \mu\text{m}$ , 单指的  $n$  阱宽度  $l_y = 3 \mu\text{m}$ , 探测器面积为  $70 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$ 。

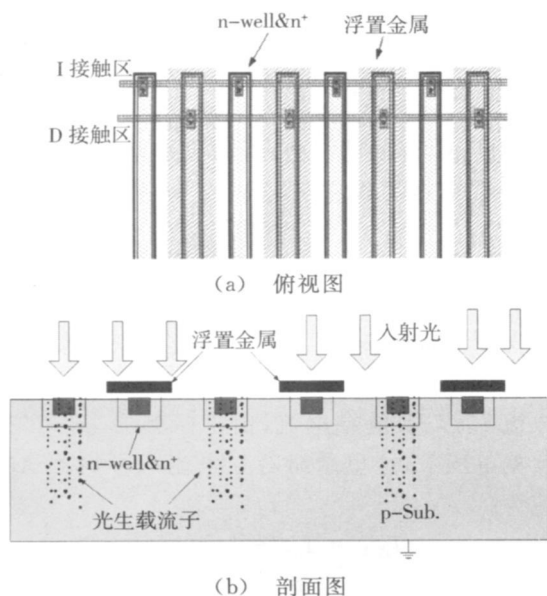


图 1 SM 光探测器

图 2 为 SM 探测器单指的物理模型。从左往右依次是 CMOS 工艺中的钝化与介质层 ( $\text{Si}_3\text{N}_4$  和  $\text{SiO}_2$ )、 $n^+$  层(厚度  $x_s$ )、 $\text{r Well}$ (阱深  $x_n$ )、 $\text{p}$  衬底(产生光电流的有效硅片厚度为  $x_b$ )。这个结构的一个特点是增加了表面的  $n^+$  层, 这与  $\text{r Well}$  之间形成

$$\frac{J_{(I+D)}(j\omega)}{\phi_0(j\omega)_{\text{rsub}}} = q\alpha L_n e^{-\alpha x} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\pi^2 (2n-1)^2} \frac{1}{\alpha L_n + \sqrt{1 + j\omega\tau_n + \left(\frac{(2n-1)\pi L_n}{l}\right)^2}} \quad (2)$$

式中,  $J_{(I+D)}$  为 I 区和 D 区衬底光生少子(电子)由于扩散运动所引起的电流密度之差。

$$J_I(j\omega) = q \frac{L_p^2}{l} \frac{32}{\pi^2} \frac{(1 - e^{-\alpha l_1})}{l_{x_1}} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\frac{2l_{x_1}}{l_y} \left(\frac{1}{2n-1}\right)^2 + \frac{2l_y}{l_{x_1}} \left(\frac{1}{2m-1}\right)^2}{\left(\frac{(2n-1)\pi L_p}{2l_{x_1}}\right)^2 + \left(\frac{(2m-1)\pi L_p}{2l_y}\right)^2 + 1 + j\omega\tau_p} \quad (3)$$

一个高低结结构, 减少表面复合和加速光生少子向空间电荷区的扩散, 对少子的影响归结到表面结泄漏速度  $S_{\text{ms}}^{\text{[3]}}$ , 这种结构比较适用于  $780 \sim 850 \text{ nm}$  波长的探测。

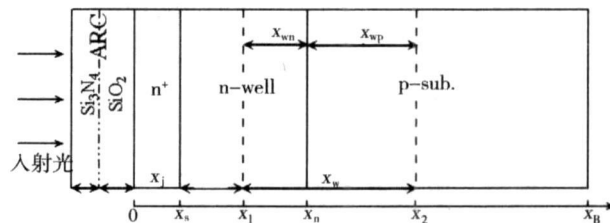


图 2 单指的物理结构

图 2 中,  $x_w$  为  $\text{r Well} / \text{p Sub}$  二极管耗尽区的宽度,  $x_{wn}$  和  $x_{wp}$  分别为耗尽区  $x_w$  在  $\text{r Well}$  和  $\text{p Sub}$  侧的宽度。这里把未被金属屏蔽的区域设为 I 接触区(Immediate Contact), 设被金属屏蔽的区域为 D 接触区(Deferred Contact), 可分为三个光生电流的产生区域:  $\text{pn}$  结以下到  $\text{p Sub}$  区( $\text{p Sub}$  区),  $\text{pn}$  结上表面至  $n^+$  区上表面区域,  $\text{pn}$  结耗尽层区域(Space Charged Region, SCR)。从三个区域的载流子运动方程出发, 采用拉普拉斯变换法, 可以分析获得各区的光生电流密度<sup>[2]</sup>。这里,  $D_{pn^+}$ 、 $D_p$ 、 $D_n$  分别为  $n^+$  区,  $\text{r Well}$  区和  $\text{p Sub}$  区的少子扩散系数;  $\tau_n$ 、 $\tau_p$  为电子少子寿命与空穴少子寿命;  $L_{pn^+}$ 、 $L_p$ 、 $L_n$  分别为  $n^+$  区,  $\text{r Well}$  区和  $\text{p Sub}$  区的少子扩散长度;  $\alpha$  代表光吸收系数,  $\phi_0$  为稳态下表面单位面积入射光子通量,  $R$  为表面反射系数。

### 1.1.1 $\text{p Sub}$ 区

该区域的共模光生电流密度响应公式为<sup>[3]</sup>

$$\frac{J_{(I+D)}(j\omega)}{\phi_0(j\omega)_{\text{rsub}}} = \frac{1}{2} q\alpha L_n e^{-\alpha x} \frac{1}{\alpha L_n + \sqrt{1 + j\omega\tau_n}} \quad (1)$$

式中,  $J_{(I+D)}$  为 I 区和 D 区衬底光生少子(电子)由于扩散运动所引起的电流密度之和,  $l_x$  为从  $n^+$  区上表面到  $\text{pn}$  结下表面的深度, 即  $l_x = x_n + x_{wp}$ 。

该区域的差分光生电流密度响应公式为<sup>[3]</sup>

### 1.1.2 $\text{pn}$ 结上表面至 $n^+$ 区上表面区域

D 接触区的光生电流密度约为零, I 接触区的光生电流密度公式为<sup>[3]</sup>

式中,  $L_{x_1}$  为 pn 结上表面至  $n^+$  区上表面的深度, 即  $L_{x_1} = x_n - x_{wp}$ 。

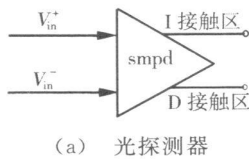
$$\frac{I_l(j\omega)}{\Phi_0(j\omega)_{SCR}} = q \frac{2x_w}{l} \left[ 1 - \exp(-\alpha \cdot l_x) + q \frac{L_{x_1}}{l} \exp(-\alpha \cdot L_{x_1}) (1 - \exp(-\alpha \cdot x_w)) \right] \quad (4)$$

利用 CSMC 工艺参数, 可对探测器各区的响应度与带宽进行数值计算, 为探测器的 Spice 模型提供必要的数值基础。

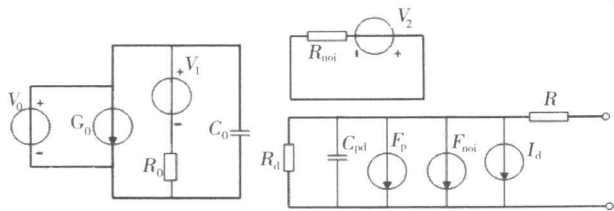
1.2 等效 SPICE 电路模型的建立

为了克服现有的光探测器模型不能反映器件的内部特征, 或是无法准确模拟器件的噪声特性, 且都忽略了探测器端电压的影响等缺点, 本文建立一个完整的新探测器模型, 包含光电流、暗电流、暗电阻和结电容模型等。

如图 3(a) 所示, SM 光探测器(PD) 用一个四端网络结构来等效, 以  $V_{in}^+$  和  $V_{in}^-$  两端的电压差来等效入射光的光功率; I 和 D 分别是 SM 探测器的 I 接触端和 D 接触端。现以探测器 D 接触端电路模型的建立来说明建模过程, 如图 3(b)。



(a) 光探测器



(b) D 接触端等效电路模型

图 3 SPICE 电路模型

1.2.1 光电流( $F_p$ )模型

光电探测器的光电流模型包括两部分: 稳态模型和动态模型。如图 3 所示, 压控电流源  $G_0$  探测来自光源  $V_0$  的信号, 根据光响应度并转化为一定大小的电流, 产生静态电流  $I_{eq}$ ,  $I_{eq}$  通过一个并联 RC 电路(由  $R_0$  和  $C_0$  组成), 再以电流控制电流源  $F_p$  探测流经电压源  $V_1$  ( $V_1 = 0$ ) 的电流, 即为动态电流  $I_{opt}$ 。  $I_{eq}$  与  $I_{opt}$  在数值上分别为

$$I_{eq} = R_D V_0$$

$$I_{opt} = \frac{I_{eq}}{1 + j\omega R_0 C_0} \quad (7)$$

式中,  $R_D$  为探测器 D 端光谱响应度;  $R_0$  和  $C_0$  分别为引入的等效电阻和等效电容, 满足  $1/R_0 C_0 =$

1.1.3 pn 结耗尽层区域

D 接触区的光生电流密度为零, I 接触区的光生电流密度公式为<sup>[5]</sup>

$2\pi f_{-3dB}$ ,  $f_{-3dB}$  为 D 接触端带宽。为了减小引入  $R_0$  对噪声特性的影响,  $R_0$  应取足够大, 本文均取到几百兆欧以上。

1.2.2 结电容( $C_{pd}$ )模型

忽略 pn 结侧面电容的影响, 则探测器的结电容可近似表示为一个平板电容:

$$C_{pd} = \frac{\epsilon_s A_0}{x_w} = A_0 \sqrt{\frac{\epsilon_s q N_A N_D}{2(N_A + N_D)(V_{bi} - 2kT/q - V)}} \quad (8)$$

式中,  $\epsilon_s$  为硅的介电常数,  $N_D$  和  $N_A$  分别为施主和受主浓度,  $V_{bi}$  为内建电势; 考虑到串联电阻的影响, 式中  $V$  取电容两端偏压, 在本文中  $A_0 = 70 \mu m \times 70 \mu m \times \frac{3}{14}$ 。

1.2.3 暗电流( $I_{dark}$ )模型

探测器暗电流主要有非耗尽区热平衡载流子的扩散电流  $I_{diff}$ 、耗尽区的产生-复合电流  $I_{gr}$ 、表面复合电流  $I_{sf}$ , 以及隧穿电流, 由于探测器工作在很低的反偏电压下, 这里忽略隧穿电流的影响。总的暗电流为

$$I_{dark} = I_{diff} + I_{gr} + I_{sf} \quad (9)$$

1.2.4 暗电阻( $R_d$ )模型

暗电阻是零偏压、无光照下的动态电阻, 它与反向饱和电流  $J_0$  之间有如下关系<sup>[6]</sup>:

$$R_d = \left( \frac{dV_{bias}}{dI} \right)_{V_0}, V_{bias} = 0 = \frac{kT}{qI_0} = \frac{kT}{qA_0 J_0} \quad (10)$$

1.2.5 串联电阻( $R_s$ )模型

可以从 IC 厂商提供的二极管模型中的串联电阻参数, 或者双极型晶体管的模型中的集电极串联电阻参数来计算。

1.2.6 噪声( $F_{noi}$ )模型

散弹噪声是探测器的主要噪声, 不计背景辐射电流, 散弹噪声谱密度为<sup>[6]</sup>

$$\overline{I_n^2} = 2q(I_{opt} + I_{dark}) \quad (11)$$

为了能准确分析探测器的噪声特性, 可以借助电阻热噪声来等效热噪声谱密度  $\overline{I_{R_{noi}}^2}$  来实现:

$$\overline{I_{R_{noi}}^2} = \frac{4kT}{R_{noi}}$$

$$R_{noi} = \frac{2kT}{q(I_{opt} + I_{dark})} \quad (12)$$

因此,可通过用电流控制电流源  $F_{noi}$ , 探测流经  $V_2 (V_2 = 0)$  的电流, 就可把  $R_{noi}$  的噪声模型引入。

### 1.3 仿真结果

本文利用 CANNES SPECTRE 仿真器建立 SPICE 模型, 模拟了探测器的交流特性。如图 4 所示, 探测器 I 接触区与 D 接触区差分低频响应度为  $62 \text{ mA/W}$ ,  $-3 \text{ dB}$  带宽为  $400 \text{ MHz}$ 。

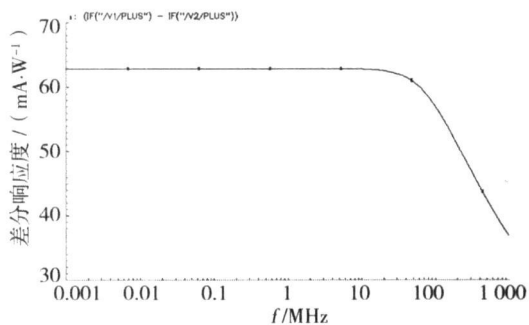


图 4 SM 探测器的交流特性

## 2 前置放大器的设计

图 5 为光接收芯片电路框图, I 接触端和 D 接触端分别连接一个互阻放大器 TIA (Trans Impedance Amplifier), 并连接三级差分放大器 DA (Differential Amplifier), 以及输出缓冲 OB (Output Buffer) 来实现阻抗匹配, 电路中 4 个电阻  $R$  与外加电容  $C$  组成了直流负反馈网络, 以稳定直流点和交流增益。由于探测器采用了差分输出, 而且响应度较小, 因此后续的放大器应当采用差分形式, 并提供足够大的增益, 以克服噪声的影响。

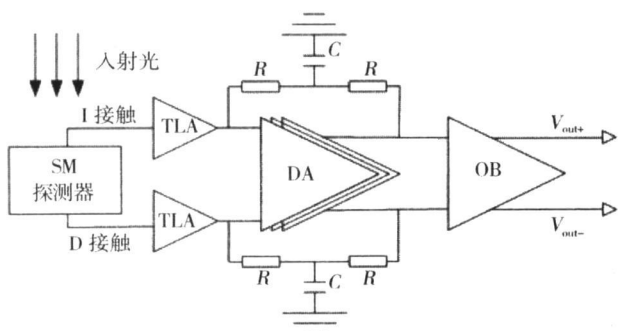


图 5 光接收机示意图

跨阻放大器采用了如图 6 所示的 RGC (Regulated Gascade) 结构, 其中  $R_1, R_s, M_1, M_b, R_b$  构成 RGC 结构, 它具有稳定的直流偏置及非常小

的输入阻抗<sup>[7]</sup>。电源电压为  $5 \text{ V}$ 。DA 采用了有源电感作负载的差分放大器结构(如图 7), 利用并联峰化技术来拓宽带宽。

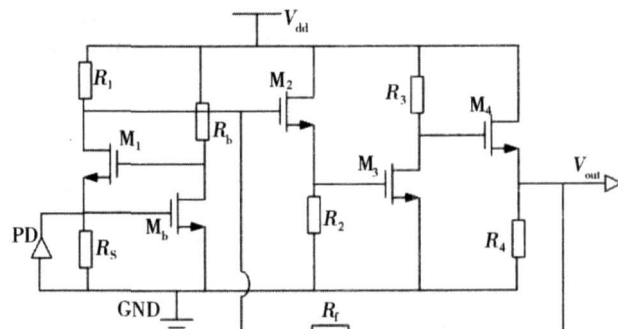


图 6 RGC 结构的互阻放大器

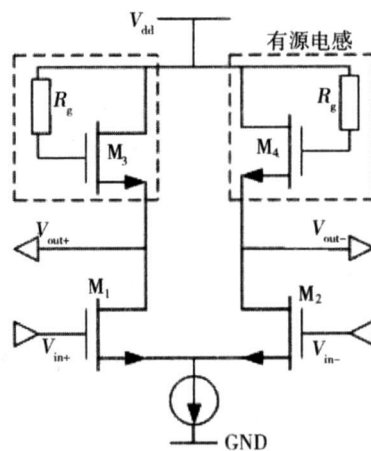


图 7 有源电感负载放大器

结合探测器新的 SPICE 等效电路模型, 经仿真获得光接收芯片的带宽为  $320 \text{ MHz}$ , 增益为  $0.81 \text{ kV/W}$ , 功耗为  $91 \text{ mW}$ 。图 8 为 OEIC 的仿真输出眼图。

输入信号为  $400 \text{ Mb/s}$ , 峰峰值幅度为  $20 \mu\text{W}$  的伪随机序列脉冲光。

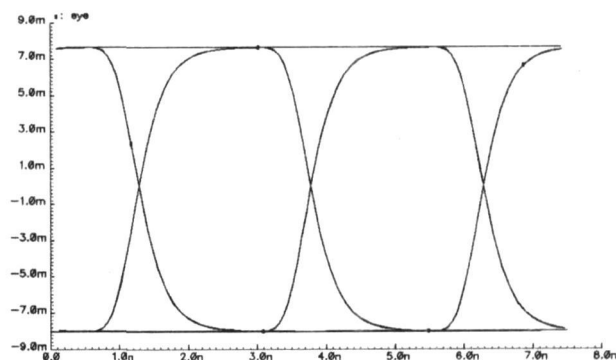


图 8 OEIC 输出信号眼图

(下转第 42 页)

规格液晶的显示要求;采用 Ag 剥离工艺制备镜面反射电极,避免了对超净间的污染;采取 U 形电极布局,把 ITO 电极从芯片管脚引出,方便 COMMON 电压的施加。独立开发出 QVGA 分辨率、16 级灰度、刷新频率为 50 Hz、可用于动态视频显示的 LCoS 液晶微显示面板。

#### 参考文献:

- [1] 刘会刚,耿卫东. LCoS 背投技术及其在中国的发展 [J]. 现代显示, 2007(2):
- [2] 代永平,王隆望. CMP 平坦化技术在 LCoS 显示器中的应用 [J]. 光电子技术, 2003, 23(1): 41-45.
- [3] 欧毅,宋玉龙. LCoS 反射层的实验研究 [J]. 液晶与显示, 2005, 20(6): 554-557.
- [4] 代永平,周晶晶,张永利,等. LCoS 显示芯片的研制 [J]. 电子技术应用, 2004, 30(4): 74-76.
- [5] Lee S, Morizio J C, Johnson K M. Novel frame buffer

pixel circuits for liquid crystal on silicon microdisplays [J]. IEEE Solid State Circuits, 2004, 39(1): 132-139.

- [6] Lee J, Chung Y. ASIC design of color control driver for LCOS (liquid crystal on silicon) micro display [J]. IEEE Trans. on Consumer Electronics, 2001, 47(3): 278-282.
- [7] Huang H C, Cheng P W, Kwok H S. Integrated digital input driver for active matrix liquid crystal on silicon display [C]// IEEE Region 10 International Conference on Microelectronics and VLSI, 1995: 476-479.
- [8] Ju T H, Lin W, Lee Y C, et al. Packaging of a 128 by 128 liquid crystal on silicon spatial light modulator using self pulling soldering [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1995, 7(9): 1010-1012.

#### 作者简介:

王文博(1979-),男,博士生,研究方向为 Si 器件与集成技术。

**E-mail:** briskest@gmail.com

(上接第 37 页)

### 3 结论

完整的探测器模型使 OEIC 的设计更加准确。仿真结果表明 SM 探测器相对于 CMOS 工艺下普通 pn 型光探测器,工作频率能达到高速数据通信的要求。然而,SM 探测器较低的响应度,使得前置放大电路中必须提高增益,来克服输入噪声的影响;且 SM 探测器 I 接触端与 D 接触端直流响应度不等,前置放大电路须通过较深的直流负反馈来克服探测器 I 与 D 接触区输入不对称性带来的影响。上面两个因素,成为前置放大电路设计的难点,也制约了光接收芯片 OEIC 的性能。

#### 参考文献:

- [1] Huang Beiju, Gu Ming, Liu Haijun, et al. A monolithically integrated optical receiver with spatially modulated light detector in CMOS technology [C]// 2006 8th International Conference on Solid State and Integrated Circuit Technology, 2006: 209-211.
- [2] 卞剑涛,程翔,陈朝.基于 Laplace 变换法的光电探测器频率响应研究 [J]. 光子学报, 2007, 36(10): 1804-1807.

[3] Genoe J, Coppee D, Stiens, et al. Calculation of the current response of the spatially modulated light CMOS detector [J]. IEEE Trans. on Electron. Devices, 2001, 48(9): 1892-1902.

- [4] Sinha A, Chattopandhyaya S K. Effect of heavy doping on the properties of high low junction [J]. IEEE Trans. on Electron. Devices, 1978, 25(12): 412-414.
- [5] Jutzi M, Grozing M, Gaugler E. 2-Gb/s CMOS optical integrated receiver with a spatially modulated photodetector [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2005, 17(6): 1268-1270.
- [6] 齐丕智.光敏器件及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [7] Park S M, Toumazou C. Low noise current mode CMOS transimpedance amplifier for gigabit optical communication [C]// Circuits and Systems, 1998, 1: 293-296.

#### 作者简介:

陈伟(1984-),男,福建省莆田人,2006年毕业于厦门大学机电系,获学士学位,现为硕士研究生,主要从事光纤通信高速集成电路以及射频集成电路的研究。

**E-mail:** chengflying@163.com