

# 晶体管栅形状对单粒子瞬态脉冲特性的影响研究

赵馨远, 张晓晨, 王 亮, 岳素格

(北京微电子技术研究所 抗辐射加固工程中心, 北京 100076)

**摘 要:** 通过三维器件模拟仿真, 研究了基于 CMOS 0.18  $\mu\text{m}$  工艺下标准条形栅和环形栅结构 MOS 晶体管的单粒子瞬态响应. 研究结果表明, 单粒子轰击条形栅器件与环形栅器件产生的单粒子瞬态脉冲特性具有非常大的区别. 分析了栅形状对单粒子瞬态的影响在 PMOS 和 NMOS 器件中的不同机理, 对单粒子瞬态加固设计具有指导性意义.

**关键词:** 单粒子瞬态脉冲; 瞬态脉宽; 环形栅; 寄生双极放大效应

中图分类号: O47

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)10-0076-05

## Impact of Gate Shape of Transistor on Single Event Transient Pulse

ZHAO Xin-yuan, ZHANG Xiao-chen, WANG Liang, YUE Su-ge

(Department of Radiation-hardening, Beijing Microelectronics Technology Institute, Beijing 100076, China)

**Abstract:** 3D-TCAD simulations in a 0.18  $\mu\text{m}$  process are used to show the effect of gate shapes on the single event transients of both PMOS and NMOS. The result turn out that the SET pulse widths of enclosed layout transistors are much smaller than the standard layout transistors. The mechanisms and process that affect the charge collection in both PMOS and NMOS of different layout structures are studied. And suggestions are made towards design guidelines and hardening approaches.

**Key words:** SET; pulse width; enclosed layout; parasitic bipolar transistor

### 1 引言

天然辐射环境所引起的空间电子系统的失效机制主要包括总剂量效应和单粒子效应<sup>[1-2]</sup>. 环形栅结构的器件对总剂量效应有着良好的加固效果, 尤其是对抑制总剂量效应引起的源漏泄漏电流, 效果十分显著, 在抗辐射加固电路中有广泛应用. 单粒子效应(SEE)是由单个高能粒子沉积电离所引起的, 包含单粒子翻转(SEU)、单粒子栓锁(SEL)和单粒子瞬态(SET)等. 由于航天器逐渐更多地采用大规模和超大规模集成电路, 近年发现单粒子效应变得更加显著, 其损伤的模式也日趋复杂. 随着工艺尺寸的减小, 单粒子瞬态效应越来越严重, 日益成为集成电路发生软错误的主要来源, 近年来成为国际上的研究热点之一<sup>[3-4]</sup>.

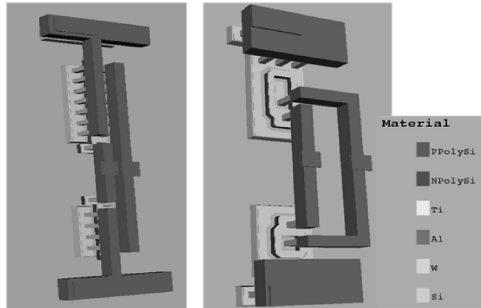
SET 可以在电路中传播, 并被电路终端的存储结构捕获, 从而引起 SEU. 目前针对环形栅结构的单粒子效应研究还不够充分, 本文建立特征尺寸为

0.18  $\mu\text{m}$  的 NMOS 管及 PMOS 管条栅及环栅三维器件模型, 采用 TCAD 软件模拟反相器单元的 PMOS 管和 NMOS 管分别受到单粒子轰击时的瞬态响应, 通过对比传统的条形栅结构与环形栅结构的 SET 脉宽特征, 讨论环栅版图结构对 SET 瞬态的影响并分析不同栅形状对单粒子瞬态脉冲特性的影响机理.

### 2 仿真结构

环形栅结构的特点是 CMOS 器件的栅呈环形包围器件的某一极, 且栅本身被另一极包围, 通常使用时选择漏极被包围. 本文针对环漏结构进行研究, 对条形栅和环形栅版图结构的 PMOS 管和 NMOS 管均构建了三维模型, 并且分别组成条形栅反相器和环形栅反相器. 如图 1 所示, (a) 中反相器采用传统条形栅版图结构, (b) 中反相器采用了抗总剂量加固版图结构——环形栅. 为了减小周围环境对反

相器电荷收集的影响,使得粒子和器件反应完全,反相器模型均建立在  $150\text{ }\mu\text{m}\times 150\text{ }\mu\text{m}\times 50\text{ }\mu\text{m}$  的衬底上.两种不同版图中同类型的晶体管器件尺寸均相同.衬底面积、衬底接触数量以及衬底接触到器件漏极的距离也完全相同.采用 SPICE 模型校准后的器件三维模型,进行单粒子轰击仿真.



(a)传统条形栅版图结构 (b)环形栅加固版图结构

图1 两种不同版图结构的反相器三维模型

本文采用 Geant4 软件通过蒙特卡洛仿真模拟单粒子穿过器件的过程,并将输出结果直接作为器件仿真的输入.设定采用能量为 200 MeV 的 Cu 粒子以及 300 MeV 的 Au 粒子对 MOS 器件的漏极中心进行直入射,粒子穿透整个器件.在进行单粒子瞬态仿真中载流子浓度采用 Fermi 分布,载流子浓度物理模型考虑了高掺杂半导体的禁带变窄;非平衡载流子产生-复合物理模型考虑了载流子浓度对寿命影响的 Shockley 间接复合、辐射复合、俄歇复合;载流子迁移率物理模型考虑了电离杂质散射、表面散射、载流子之间散射.模拟的基本过程如下:首先不考虑产生、复合项,求得稳态解;然后在稳态解的基础上考虑单粒子注入影响,即模拟计算中加入产生、复合项,求得瞬态解,得到粒子注入后产生的电流脉冲及电势随时间的变化过程.

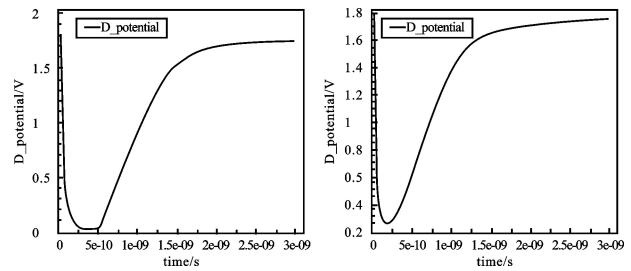
对于 CMOS 数字电路,晶体管的状态是决定漏极电荷收集量的重要因素.对于反相器来说,PMOS 管或 NMOS 管中必会有一个处于关闭状态,一个处于开启状态.关闭状态下的晶体管收集的电荷会对输出电压产生扰动,而开启状态下的晶体管收集到的电荷会增大导通管的电流,从而加强输出的逻辑电压状态.本文分别对关闭的 PMOS 管和关闭的 NMOS 管进行单粒子轰击仿真(P-hit 和 N-hit 仿真).

### 3 仿真结果及分析

#### 3.1 N-hit 仿真结果及分析

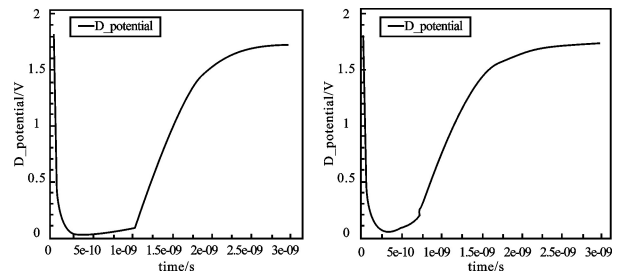
图2、图3为仿真得到的两种不同版图 NMOS

管被 Cu、Au 粒子轰击时,产生的 SET 电压脉冲.从图中可以看出,关闭的 NMOS 管漏极受到 Cu 粒子轰击时,条形栅器件和环形栅器件中产生的 SET 脉冲宽度分别为 960 ps 和 547 ps;关闭的 NMOS 漏极受到 Au 粒子轰击时,条形栅和环形栅器件中产生的脉冲宽度分别为 1 430 ps 和 1 074 ps.不难看出,环形栅结构的 NMOS 管的 SET 脉宽远小于条形栅结构.



(a)条形栅器件产生的 SET 脉冲电压波形 (b)环栅器件产生的 SET 脉冲电压波形

图2 Cu 粒子轰击关闭状态 NMOS 时,漏极产生的 SET 电压波形



(a)条形栅器件产生的 SET 脉冲电压波形 (b)环栅器件产生的 SET 脉冲电压波形

图3 Au 粒子轰击关闭状态 NMOS 时,漏极 SET 电压波形

本文以 Cu 粒子轰击为例,对环形栅减小 SET 脉宽的机制进行分析.一方面,因为环形栅版图器件和条形栅版图器件宽长比相同,则环形栅器件中漏极的面积小于条形栅器件,即在受到单粒子轰击时,环栅器件的收集区域较小.另一方面环形栅结构中源极较条形栅结构吸收了更多电子,有效减少漏极吸收的电子量,从而减小了 SET 脉宽.监测器件内部水平方向“源-沟道-漏-沟道-源”上电势随时间的变化.环形栅结构中间为漏极,四周环绕源极,在水平方向上,两侧源关于漏极对称,图4中只保留其中一侧“源-沟道-漏”的电势变化,(其中  $x$  坐标小于  $1.48\text{ }\mu\text{m}$  为源极,大于  $1.66\text{ }\mu\text{m}$  为漏极,中间为沟道).稳态时,漏极为高电势 1.8 V,衬底和源极接

VSS. Cu 粒子轰击 NMOS 漏极产生电子空穴对,漏极吸收电子,电势降低;源极和衬底吸收空穴,电势升高. 由于物理位置关系,衬底吸收到更多的空穴,衬底电势高于源极,从而使得由 P 型衬底和 N 型源极组成的 PN 结导通(如图 4 中 10 ps 电势关系). P 型衬底通过导通的 PN 结将大量空穴注入源极,使得源极电势升高(图 4 中 120 ps 电势关系). 如图 5 所示,在源极和漏极区域均存在带正电的净电荷,这些带正电的净电荷与衬底带负电的净电荷构建电场,使得源极和漏极均吸收电子.

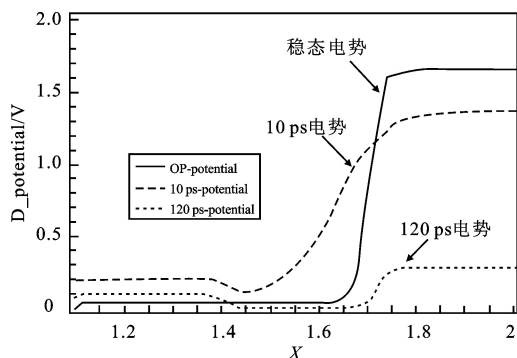


图 4 环形栅结构不同时刻“源-沟道-漏”的电势变化

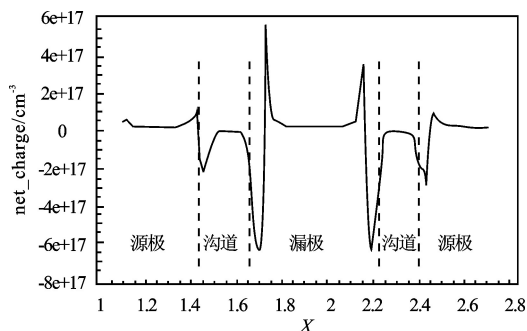
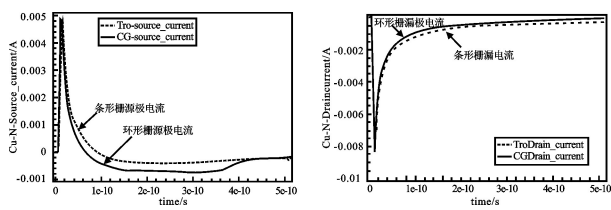


图 5 环形栅结构中 120 ps 时,沿水平方向“源-沟道-漏-沟道-源”的净电荷数量

而由于环形栅结构的源极面积更大,在漏极四周均存在上述导通 PN 结,如图 6(a)所示,在 60 ps 到 400 ps 间,环形栅源极电子电流持续大于条形栅电子电流,使得环形栅器件的源极吸收的电子更多. 这大大减小了漏极收集到的电子数量,图 6(b)所示为 NMOS 漏极 SET 电流波形. 可以看出,条形栅版图的 NMOS 漏极比环形栅结构 NMOS 收集了更多的电荷,从而引起更宽的 SET 脉冲.

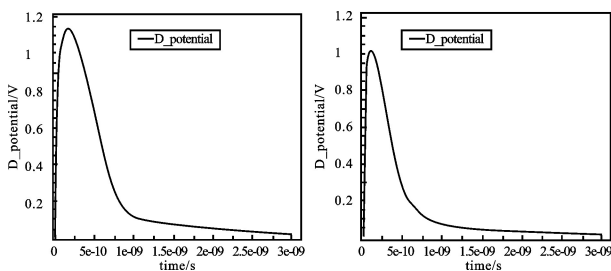
### 3.2 P-hit 仿真结果及分析

采用单粒子对关闭的 PMOS 漏极中心进行轰击. 如图 7 所示, Cu 轰击 PMOS 管, 条形栅器件和环形栅器件中产生的 SET 脉冲宽度分别为 480 ps 和 350 ps. 在受到 Au 粒子轰击时(图 8)条形栅器件



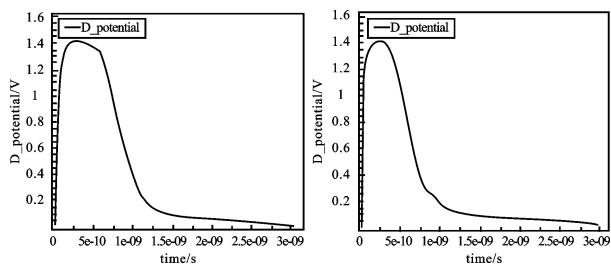
(a) NMOS 源极瞬态电流波形 (b) NMOS 漏极瞬态电流波形

图 6 Cu 轰击 NMOS, 源极和漏极瞬态电流波形  
漏极的 SET 脉宽为 820 ps, 而环形栅器件漏极 SET 脉宽只有 600 ps. 仿真结果证明, 对于 PMOS 器件, 环形栅器件同样具有较好的抗单粒子瞬态性能.



(a) 条形栅器件被 Cu 粒子轰击产生的 SET 脉冲电压波形 (b) 环栅器件被 Cu 粒子轰击产生的 SET 脉冲电压波形

图 7 Cu 粒子轰击关闭的 PMOS 管时, 漏极产生的 SET 电压波形



(a) 条形栅器件被 Au 粒子轰击产生的 SET 脉冲电压波形 (b) 环栅器件被 Au 粒子轰击产生的 SET 脉冲电压波形

图 8 Au 粒子轰击关闭的 PMOS 管时, 漏极产生的 SET 电压波形

P-hit 中环形栅器件的单粒子瞬态电压脉宽较小, 一方面因为环形栅器件的漏极面积, 即敏感面积较条形栅器件较少. 另一方面, 已有研究表明在 PMOS 器件中寄生双极放大效应是影响 SET 脉冲宽度的最主要的因素<sup>[5]</sup>. 在条形栅器件中: 发生单粒子轰击前, 器件处于稳态, 漏极接电源电势, 栅极输入高电平, 漏极输出低电平, N 阱中电势为高; 单粒子轰击漏极中心, 引发大量电子空穴对, 电子被 N 阱和源极收集, 两者电势降低, 漏极收集空穴电势升高. 在此过程中, 当源极与 N 阱间的电势差大于 PN 结的开启电压, 且 N 阱电势高于漏极电势, 则由“源-沟道-漏”组成的 PNP 双极晶体管开启, 源极为

发射极向漏极注入大量电荷,导致漏极处收集到的电荷增加,电势扰动增强,脉宽增宽。而在环形栅版图中,由于漏极电势上升较快(图9),使得作为基极的沟道与作为集电极的漏极之间没有形成通路,寄生三极管并未开启。

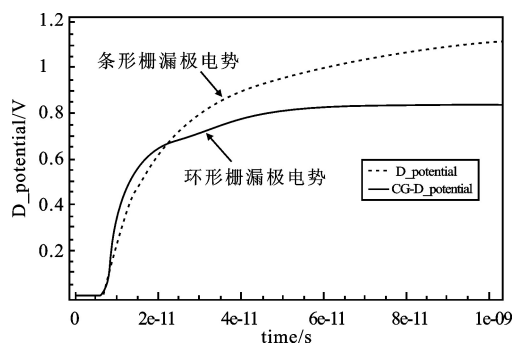


图9 两种版图结构 PMOS 漏极 SET 脉冲波形

图10描述了两种不同版图 PMOS 管器件中沿“源-沟道-漏”水平方向上电势的变化(环形栅器件只取一侧源极)。稳态时(图中 OP),两种器件状态相同。单粒子轰击器件漏极中心,产生大量电子空穴对,由于环形栅结构漏极被大面积源极包围,沟道电势下降的速度和漏极电势上升的速度均比条形栅结构快,如图中 10 ps 时电势曲线,条形栅器件的沟道电势高于环形栅器件沟道,而漏极电势低于环形栅器件沟道,故条形栅器件中的寄生双极管导通,而环形栅器件中的寄生三极管并未导通。20 ps 时,通过电荷收集,两种版图的器件中漏极电势均高于沟道电势。至此为止环形栅结构中的寄生三极管并未开启,而条形栅结构漏极则因双极放大效应吸收了大量电荷。

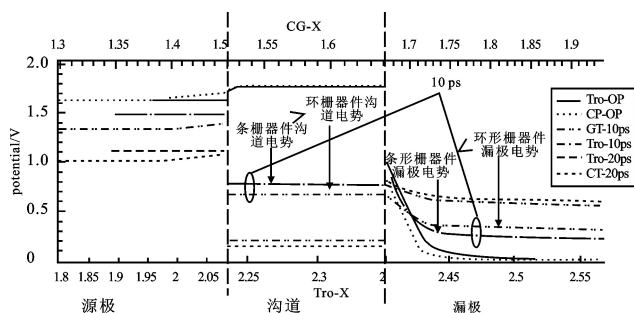


图10 两种版图的 PMOS,“源-沟道-漏”水平方向上电势的变化

#### 4 仿真分析的验证

本文设计了一种新的版图结构,双源极器件,验证上一节中关于环形栅 NMOS 管的 SET 特征机理分析。如图11(a),新版图中器件宽长比,阱/衬底接

触的面积,以及接触孔到漏极距离均与前条形栅结构相同,仅将原来的源极并在漏极两侧,栅极变成两个长度为原栅长 1/2 的短栅平行放置并互相连接,结构同两个并联器件。设定采用 Cu 粒子对器件漏极中心进行轰击,仿真结果与原条形栅结果对比如图11(b)所示。双源极器件(图中 DS-D\_potential)的 SET 脉冲宽度比原条形栅结构减小了约 20%,良好的验证了上文中分析的结论。轰击 NMOS 管时,源极对单粒子瞬态脉宽起抑制作用,增大源极对漏极的包围区域,可以有效减小 SET 脉宽。

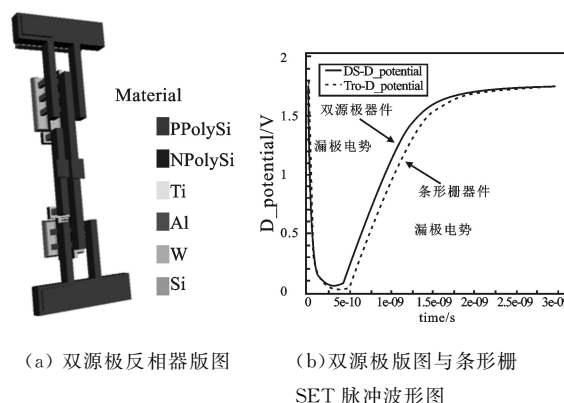


图11 双源极反相器版图及仿真结果对比

上节分析认为,条形栅 PMOS 管被单粒子轰击时,寄生三极管开启,导致脉宽较宽;而环形栅寄生双极放大效应不明显,所以产生的 SET 脉宽较窄。保护环是公认的有效保持阱电势、抑制双极放大效应的结构<sup>[6]</sup>。本文在原条形栅和环形栅版图上分别增加保护环结构,且保护环到有源区的位置相同,其余结构均与原版图保持一致。Cu 粒子仿真结果如图12所示,保护环结构对环形栅版图的抗 SET 性能改善并不明显,而具有保护环结构的条形栅器件的 SET 脉冲则明显减小,这一结果充分验证了上文分析的正确性,即 PMOS 管漏极区域被源极围绕可,以有效抑制寄生双极放大效应的发生。

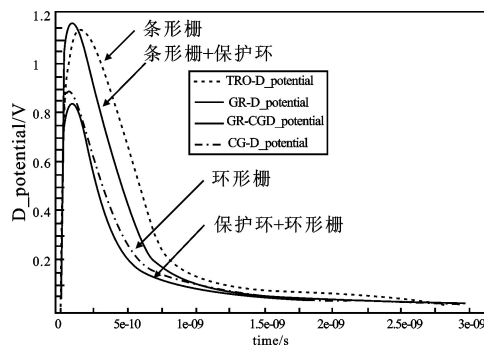


图12 Cu 轰击漏极不同版图的 PMOS 产生的 SET 脉冲

## 5 结束语

本文研究了不同栅的形状对器件单粒子瞬态特性的影响. 研究表明, 相比条形栅晶体管, 环形栅晶体管具有较好的抗单粒子瞬态性能. 环形栅 NMOS 器件的源极吸收单粒子产生的电子, 从而减小脉宽; 环形栅 PMOS 可以有效抑制寄生双极放大效应从而减小脉宽.

本文的研究结果表明, 晶体管的漏极和源极的位置布局对器件单粒子瞬态特性有很大影响, 在抗单粒子瞬态加固设计中应注意增大源极包围漏极的面积, 可以更好地发挥源极抑制漏极吸收电荷的作用, 并抑制寄生双极放大效应的发生, 可以有效地减小漏极吸收到的单粒子轰击产生的电荷. 在今后的工作中, 将通过设计与上述仿真结构对应的测试电路, 对器件的单粒子瞬态特性的影响通过重离子试验进行验证.

### 参考文献:

- [1] Peck D S. Surface effects of radiation on transistors [J]. Bell Syst Tech J, 1963(42): 95-99.
- [2] Binder D, Smith E, Holman A. Satellite Anomalies from Galactic Cosmic Rays[J]. IEEE Trans on Nuclear Science, 1975, 22(6): 267-2680.

- [3] Massengill L W. Opportunities for single event modeling in emerging commercial technologies[C]// presented at the European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems. France: IEEE, 1999.
- [4] Baumann R C. Single event effects in advanced CMOS Technology[C]// Proc IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conf Short Course Text. [s. l.]: IEEE, 2005.
- [5] Dodd P F, Massengill L W. Basic mechanisms and modeling of single-event upset in digital microelectronics[J]. IEEE Trans On Nuclear Science, 2003, 50(3): 583-602.
- [6] Narasimham B, Bhuvana B L, Schrimpf R D, et al. Effects of guard bands and well contacts in mitigating long SETs in advanced CMOS processes[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2008, 55(3): 1708 - 1713.

### 作者简介:



赵馨远 女, (1989-), 研究生. 研究方向为数字电路的单粒子效应机理及抗单粒子加固技术.

(上接第 75 页)

- [3] Fiez T S, Allstot D J. CMOS switched-current ladder filters [J]. IEEE J. Solid-state circuit, 1990, SC-25(6): 1360-1367.
- [4] 何怡刚, 黄娇英, 彭玉楼. 一维小波变换及其逆变换结构[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2003, 30(6): 60-62.
- [5] Meyer Yves. Wavelets-algorithms and applications [M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1993: 142.
- [6] 张江洪. 高斯小波变换的开关电流电路实现[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(9): 151-154.
- [7] Moreira-Tamayo O, de Gyvez J P. Time-domain analog wavelet transform in real-time [J]. IEEE Int. Symp. Cir. & Sys., 1995(3): 1640-1643.

- [8] 鲁坚, 邹玉茹. DOG 小波的对称性图像分类[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(2): 2348-2350.
- [9] 包伯成, 胡文, 刘中, 等. DOG 小波映射伸缩和平移的动力学分析[J]. 物理学报, 2009, 58(4): 2121-2126.
- [10] 赵文山. 基于开关电流技术的模拟小波变换实现理论与方法研究[D]. 湖南: 湖南大学 2011: 66-67.
- [11] Toumazou C, Hughes J B, Battersby N C. 开关电流—数字工艺的模拟技术[M]. 姚玉洁, 刘素馨, 张培东, 等译. 北京: 高等教育出版社, 1997: 39-45.

### 作者简介:

陈坚 男, (1981-), 硕士, 讲师. 研究方向为模拟集成电路与故障诊断.