

引用格式:张洪凯,王立新,陈润泽,等. 一种基于电流差值的低工艺漂移的 BiCMOS 过温保护电路[J]. 微电子学与计算机, 2021,38(7):7-12. [ZHANG H K, WANG L X, CHEN R Z, et al. BiCMOS over temperature protection circuit with low process drift based on current difference[J]. Microelectronics & Computer, 2021,38(7):7-12.]

一种基于电流差值的低工艺漂移的 BiCMOS 过温保护电路

张洪凯^{1,2}, 王立新¹, 陈润泽^{1,2}, 郭 敏^{1,3}

(1 中国科学院 微电子研究所, 北京 100029;

2 中国科学院大学, 北京 100049;

3 北京工业大学, 北京 100124)

摘 要: 过温保护电路是功率集成电路中一个重要的功能模块. 本文设计了基于电流差值的过温保护电路, 基于 XFAB0.6 μ m BCD 工艺, 完成了全工艺角模拟仿真. 在 100 多个工艺角下的仿真结果表明: 基于电流差值的过温保护电路过温关断阈值点和过温恢复阈值点的波动相比于传统的电压型结构的过温保护电路减小了 50% 以上, 表明提出的基于电流差值的过温保护电路具有低工艺漂移的特性.

关键词: 低工艺漂移; 过温保护; BCD 工艺; 温度阈值

中图分类号: TN433

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2021)07-0007-06

BiCMOS over temperature protection circuit with low process drift based on current difference

ZHANG Hongkai^{1,2}, WANG Lixin¹, CHEN Runze^{1,2}, GUO Min^{1,3}

(1 Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100124, China;

3 Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Over-temperature protection(OTP) circuit is an important function module in power integrated circuit. An OTP circuit based on current difference is designed in this paper. Based on the XFAB 0.6 μ m BCD process, the over-temperature protection circuit is simulated under more than 100 process corners. The simulation results show that the fluctuation of over temperature turn-off and restart threshold points are both reduced by more than 50%, compared with the conventional over temperature protection circuit with voltage structure, indicating that the proposed OTP circuit has the characteristics of low process drift.

Key words: low process drift; over protection circuit; BCD process; temperature threshold

1 引言

过温保护电路是集成功率电路中一个重要的功能模块, 尤其对于功率转换器来说, 功率 MOSFET 通常工作在高压、大电流环境下, 导通损耗较大, 工作时会产生大量的热量, 引起整个电路的温度上升. 此外, 在某些异常情况下也会导致芯片内部的温度

上升, 如电源短接、线路短路或负重载等. 当功率转换器温度急剧上升时, 产生的过热可能导致电路性能参数恶化, 影响电路的可靠性, 甚至导致芯片破坏性故障, 降低产品的使用寿命, 而且过热会使得用户感到不适^[1-2]. 当芯片温度超过预定值时, 应触发 OTP 内部的比较器断电或重新启动电路, 以避免可能的损伤^[3-5]. 本文提出了一种改进版本的过温保护

电路,以减小工艺漂移.设计了两种过温保护电路(基于电流差值结构和典型的电压型结构),并在全工艺角仿真中进行了比较和验证.此外,为了尽可能准确的检测芯片的内部温度,在版图布局中,通常将过温保护电路放置在靠近功率 MOSFET 的位置.本文设计的过温关断阈值温度为 178°C ,当温度降低到 162°C 时重新将电路开启,迟滞温度为 16°C .

2 过温保护电路原理

功率转化器的过温保护电路的基本原理如图 1 所示.温度检测电路是用来检测芯片内部的温度,利用温度敏感传感器将温度信号转化为电信号^[6].过温判决电路将电信号与基准值进行比较,判断此时的温度是否处于芯片的安全工作范围,当温度升高到设定的最高阈值时,输出保护芯片的温度控制信号,温度控制信号将功率器件关断或者降低功率器件的输出功率,从而使得芯片的温度下降.

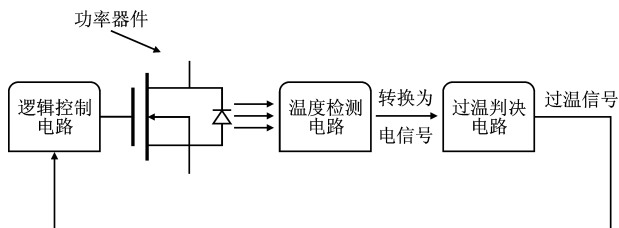


图 1 过温保护电路的工作原理

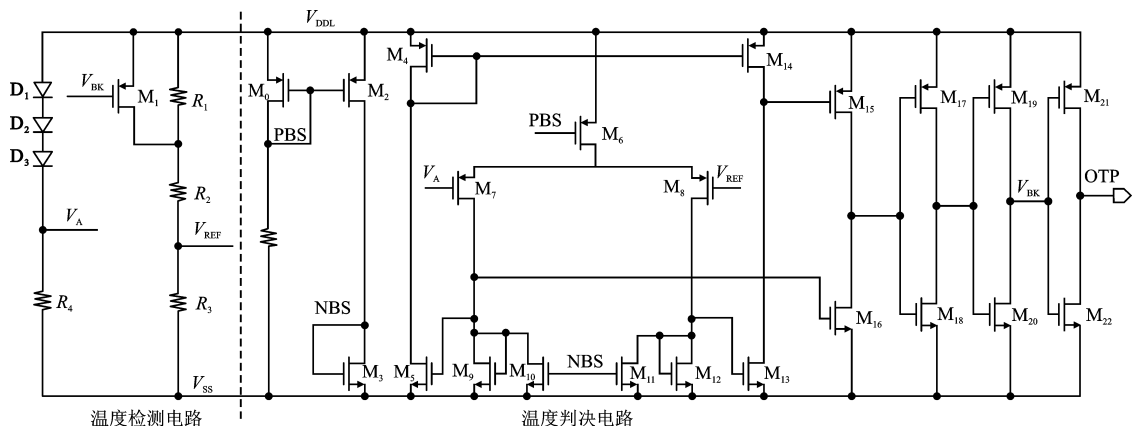


图 2 典型电压型的过温保护电路图

过温关断阈值点的迟滞功能是通过正反馈实现,如图 4 所示,在温度未超过关断阈值时, $V_A < V_{\text{REF}}$,反馈电压 V_{BK} 输出为低电平,OTP 输出高电平,MOS 管 M_1 处于开启状态(忽略导通电阻), V_{REF} 电压为:

其中,温度检测电路是整个过温保护电路的关键,它将温度的变化转化为电信号,如 PTAT 电流或电压^[7].随着 BiCOMS 工艺和 BCD 工艺的发展,可以将过温保护电路集成于片上系统.常用的片上温度检测方法主要利用二极管和三极管的温度特性来制作温度敏感元件.二极管的正向导通压降和二极管形式连接的三极管的 V_{BE} 电压,都具有负温度特性,可以通过测量其电压的变化来测量温度的变化.

3 电路结构和原理分析

3.1 典型的电压型的过温保护电路的原理和分析

图 2 是基于二极管负温度特性设计的过温保护电路,温度检测电路利用三个处于正向导通的状态的二极管作为温度的传感元件,三个二极管串联增大了对温度变化的灵敏度. V_A 点的电压是和温度有关的检测电压, $V_A = V_{\text{DDL}} - 3D_Z$ (D_Z 为二极管的正向导通压降),温度判决电路采用两级放大器作为比较器. V_{REF} 电压为电阻 R_1 、 R_2 和 R_3 的对电源 V_{DDL} 的分压,提供一个稳定的基准电压与 V_A 进行比较.如图 3 所示是 V_A 电压随温度变化的曲线图,可以看出 V_A 电压具有很好的线性度.

$$\frac{\partial V_A}{\partial T} = 5.02 \text{ V}/^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

$$V_{\text{REF}} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} V_{\text{DDL}} \quad (2)$$

当 $V_A = V_{\text{REF}}$ 时,OTP 状态发生翻转,对应的正向过温关断阈值电压 $V_A +$ 为:

$$V_A \dashv \equiv \frac{R_3}{R_2 + R_3} V_{\text{DDL}} \quad (3)$$

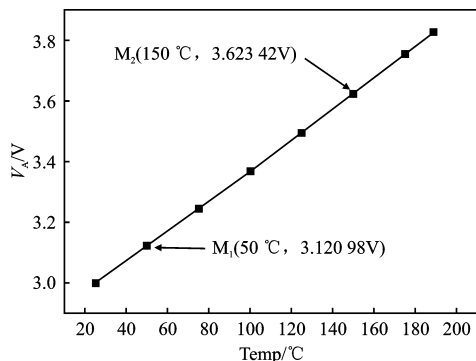


图 3 V_A 随温度变化曲线图

当温度超过温度关断阈值点时, V_A 大于 V_{REF} , V_{BK} 输出高电平, OTP 输出为低电平, PMOS 管 M_1 关断, 此时的 V_{REF} 电压为:

$$V_{\text{REF}} = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} V_{\text{DDL}} \quad (4)$$

当温度下降到使得 OTP 的输出状态发生翻转时,对应的过温恢复阈值电压 V_A 为:

$$V_A = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} V_{\text{DDL}} \quad (5)$$

可以根据图 3 所示的 V_A 随温度变化的线性关系,选择合适的阻值,设计过温关断阈值点和过温恢复阈值点分别为 178°C 和 162°C 。

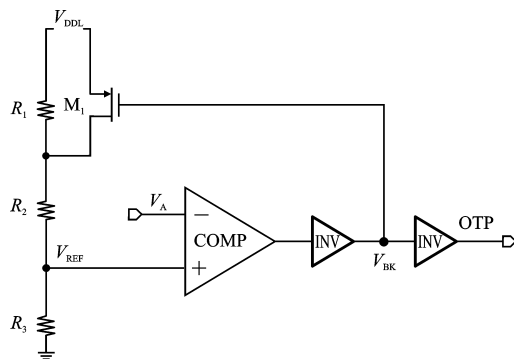


图 4 正反馈迟滞原理图

3.2 基于电流差值设计的过温保护电路的原理和分析

图5是修改后的过温保护电路,电流 I_1 和 I_2 是电路自偏置产生的电流. PNP 三极管 Q_1 的电流 I_C 公式可推导为:

$$I_C = I_S * \exp \left\{ \frac{V_{BE}}{\frac{K_0 * q}{T}} \right\} \quad (6)$$

由公式可得:

$$V_{\text{BE}} = \frac{K_0 * T}{q} * \ln\left(\frac{I_C}{I_S}\right) \quad (7)$$

式中, I_s 为双极型晶体管的饱和电流, V_{BE} 是三极管的基极和发射极的结电压, K_0 为玻尔兹曼常数, q 为电子电荷. V_{BE} 三极管具有负温度特性, 温度升高 V_{BE} 减小.

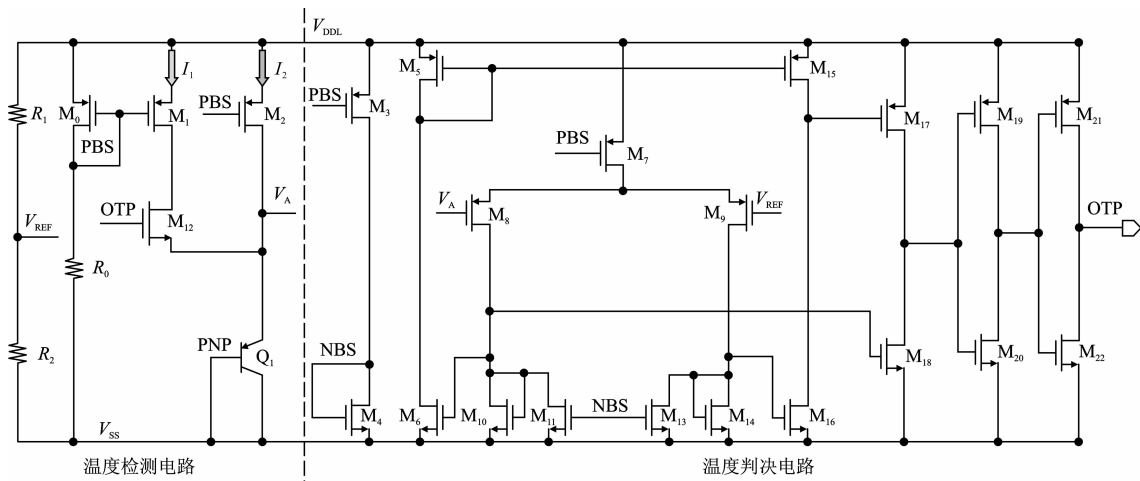


图 5 基于电流差值设计的过温保护电路

当温度从低温开始升高时, $V_A > V_{REF}$, OTP 为高电平, M_{12} NMOS管开启, 流入 PNP 晶体管的电流为: $I_1 + I_2$, 随着温度的升高 V_{BE} 电压下降, 当温度继续升高到 T_1 时 $V_A = V_{REF}$, OTP 状态发生改变, 对应的正向过温阈值电压为 V_{REF} , 当温度继续升高一点, V_A 小于 V_{REF} , OTP 翻转为低电平. 当从高温下

降时,OTP 电压为低电平, M_{12} NMOS 晶体管关断. 流入 PNP 晶体管的电流为 I_2 ,当温度继续降低到 T_2 时, $V_A = V_{REF}$,当温度继续降低一点, $V_A > V_{REF}$,OTP 翻转为高电平. 过温关断阈值点和过温恢复阈值点可分别由下列公式推导出:

过温关断阈值点 T_1 公式为:

$$T_1 = \frac{V_{REF}}{\frac{K_0}{q} * \ln(\frac{I_1 + I_2}{I_s})}$$

(8)

过温恢复阈值点 T_2 公式为:

$$T_2 = \frac{V_{REF}}{\frac{K_0}{q} * \ln(\frac{I_1}{I_s})}$$

(9)

可以根据公式(8)和(9),来选择合适的电流 I_1 和 I_2 ,设计过温关断阈值点和过温恢复阈值点分别为 178°C 和 162°C .

4 仿真结果分析

基于 XFAB 0.6 μmBCD 工艺模型,利用 Cadence 软件对电路进行仿真.

图 6 为在典型工艺角下,分别调整图 2 和图 5 结构的参数,使其过温关断阈值点和过温恢复阈值点达到 178°C 和 162°C .

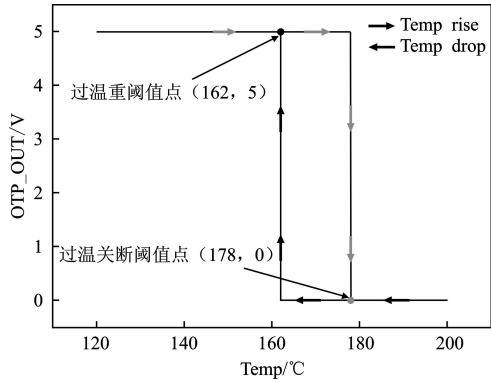


图 6 过温保护电路的迟滞特性曲线

图 7、8 显示了模拟图 2 所示电路结构的 135 个不同工艺角下 OTP 的关断阈值点和重启阈值点,得到了超过 70°C 的离散度.由于二极管的正向导通压降随工艺的变化而产生波动,而图 2 所示电路的 V_{REF} 是依靠电阻分压得到的,在不同工艺角下其电阻比例不会发生变化,可以认为 V_{REF} 在不同的工艺下是一个稳定的值.此外,关断阈值点和开启阈值点的重叠可能会导致电路的 OTP 故障.

图 9、10 显示了模拟图 5 所示电路结构的 135 个不同工艺角下 OTP 的关断阈值点和重启阈值点,得到大约 30°C 的离散度.由公式(8)和(9)可知.图 5 所示电路的过温关断阈值点个过温恢复阈值点是基于电流差值设计的,对比与图 2 所示的过温保护电路可知, V_A 不再受到二极管正向导通压降随工艺变化的影响.

图 11 和图 12 分别显示了图 2 电路结构和图 5 电路结构在 135 个工艺角下的仿真结果,可以看到,

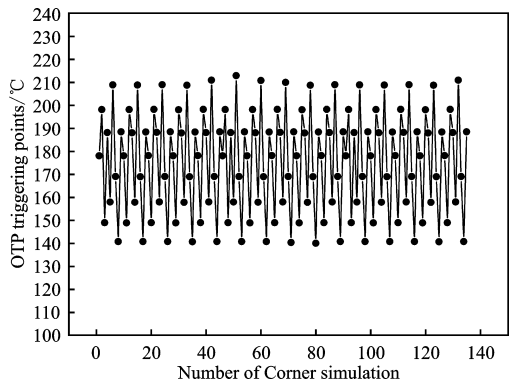


图 7 图 2 所示电路的全工艺角仿真过温关断阈值点

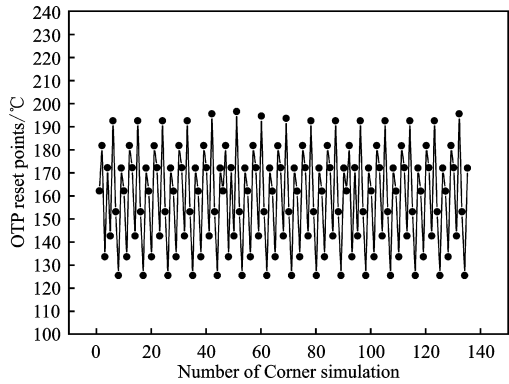


图 8 图 2 所示电路的全工艺角仿真过温恢复阈值点

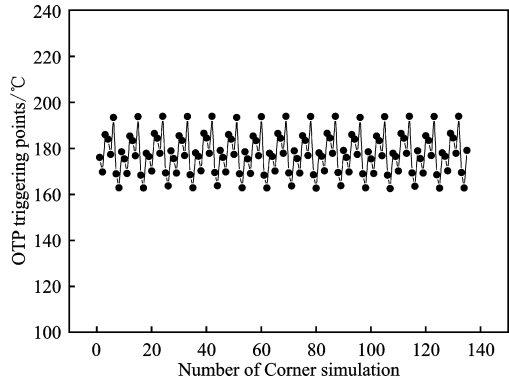


图 9 图 5 所示电路的全工艺角仿真过温关断阈值点

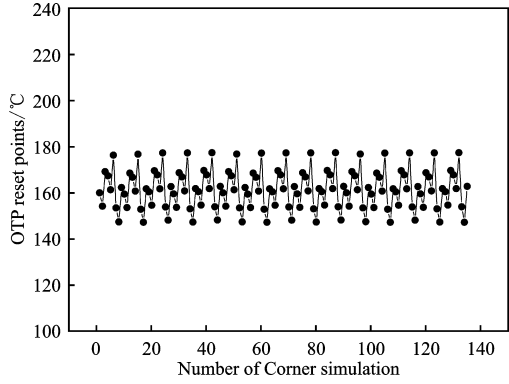


图 10 图 5 所示全工艺角仿真过温恢复阈值点
这两种电路结构的过温迟滞宽度的工艺漂移相差不多,具有较好的低工艺漂移性能.

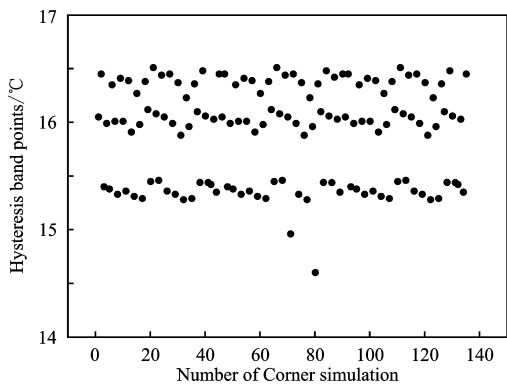


图 11 图 2 所示电路的全工艺角仿真过温迟滞宽度

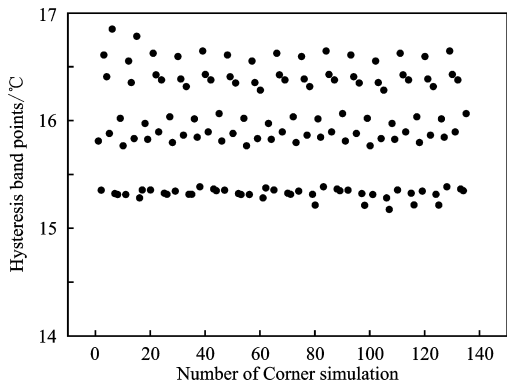


图 12 图 5 所示电路的全工艺角仿真过温迟滞宽度

表 1 显示了两种电路的性能比较, TYE 值是在 TT 工艺角下仿真测量的数据, MIN 和 MAX 是仿真模拟了 135 工艺角后, 所测量得到的最小值和最大值, 通过表 1 的数据可知, 图 5 所示电路的过温关断阈值点和过温恢复阈值点随工艺角的波动, 要比图 2 所示电路减小了 50% 以上。

5 结束语

本文介绍过温保护电路的设计, 设计了典型电压型的过温保护电路和基于电流差值的过温保护电路, 采用 XFAB06 μm BCD 工艺库设计, 并进行了全工艺角仿真模拟, 仿真结果表明: 在 135 个不同的工艺角下, 基于电流差的过温保护电路在温度关断阈值点和温度重恢复值点的波动比典型电压比较器过温保护电路减小了 50% 以上, 迟滞温度随工艺的变化量也比较小, 具有较高的精度; 同时过温关断阈值点和过温恢复阈值点可以根据需要进行调节, 因此适用于多种电源管理类芯片中的过温保护电路。

表 1 图 2 所示电路和图 5 所示电路的性能比较

参数		MIN /°C	TYE /°C	MAX /°C	$\frac{\text{MIN-TYE}}{\text{TYE}} \times 100\%$	$\frac{\text{MAX-TYE}}{\text{TYE}} \times 100\%$
图 2 电路	关断阈值点	140.1	178.0	212.9	-21.3	19.6
	重启阈值点	125.4	162.0	196.6	-22.6	21.3
	迟滞宽度	14.6	16.0	16.5	-8.6	3.1
图 5 电路	关断阈值点	162.5	178.0	193.9	-8.7	8.9
	重启阈值点	147.4	162.0	177.4	-9.0	9.5
	迟滞宽度	15.2	16.0	16.8	-5.0	5.0

参考文献:

[1] RAMASAMY S, VENKATARAMANI B, MEENATCHISUNDARAM P. A low power CMOS voltage reference circuit with sub threshold MOSFETs [J]. International Journal of Information and Communication Technology, 2009, 2(1-2): 94-107. DOI: 10.1504/IJICT.2009.026433.

[2] WANG B J, FENG Q Y, ZHUANG S X. A low voltage CMOS over-temperature protection circuit with MOSFETs working in the sub-threshold region[C]//13th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT). Hangzhou, China: IEEE, 2016: 1372-1374. DOI: 10.1109/IC-SICT.2016.7998742.

[3] PLESA C S, NEAG M, BOIANCEANU C, et al. Design methodology for over-temperature protection of an LDO voltage regulator by using electro-thermal simulations[C]//22nd International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC). Budapest, Hungary: IEEE, 2016: 46-51. DOI: 10.1109/THERMINIC.2016.7748646.

[4] TAN C W, LIU Z C, YAN Q H. A bandgap reference and over temperature protection circuit designed for TCXO chip[C]//2015 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data and Smart City.

Halong Bay, Vietnam: IEEE, 2015: 8-11. DOI:10.1109/ICITBS.2015.257.

[5] QI F, XU L Y. Development of a high-temperature gate drive and protection circuit using discrete components[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32 (4): 2957-2963. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2573643.

[6] MEIJER G C M, WANG G J, FRUETT F. Temperature sensors and voltage references implemented in CMOS technology[J]. IEEE Sensors Journal, 2001, 1 (3): 225-234. DOI:10.1109/JSEN.2001.954835.

[7] 黄泽祥. 智能功率芯片的过温保护分析与电路设计[D]. 南京: 东南大学, 2015.

HANG Z X. Analysis and circuit design of over-tem-

perature protection in smart power integrated circuit [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.

作者简介:

张洪凯 男,(1993-),硕士研究生. 研究方向为模拟集成电路设计.

王立新(通讯作者) 男,(1976-),博士,研究员. 研究方向为半导体器件的开发及可靠性研究和电源管理、智能驱动等. E-mail:wanglixin@ime.ac.cn.

陈润泽 男,(1992-),博士研究生. 研究方向为功率半导体器件的开发及可靠性验证.

郭 敏 女,(1994-),硕士研究生. 研究方向为 DC-DC 模拟电路设计.