光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.03.022

一种智能多通路自适应调控寄生供电系统

高 鹤[1,2,3]，宿晓慧[1,2,3]*，李 博[1,2,3]，刘海南[1,2,3]，赵发展[1,2,3]

（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. 中国科学院 硅器件技术重点实验室，北京 100029）

摘 要： 在全面梳理现有寄生供电系统的基础上，提出一种无需特殊工艺支持、可兼顾高速充电和低压差供电的智能多通路自适应调控寄生供电系统。该方案利用充放电控制状态机，协同双器件并行控制结构，对三条供电线路进行自适应调控切换，在提升充电速度和效率的同时，进一步模糊功耗信息。该方案可用于1-Wire芯片、高要求的光电等信息的采集以及实时监控等功能芯片的供电，并提升芯片的抗侧信道攻击能力。基于华虹宏利0.35 μm体硅CMOS工艺完成了该方案的仿真，结果表明，该系统能够将芯片内外供电压差降低到0.1 V以下，充电速度提升32%。

关键词： 寄生供电系统；多通路供电；电压监控；自适应调控系统；侧信道攻击

中图分类号： TN453 **文章编号：** 1001－5868(2021)03－0418－06

An Intelligent Multi-channel Adaptive Control Parasitic Power Supply System

GAO He[1,2,3], SU Xiaohui[1,2,3], LI Bo[1,2,3], LIU Hainan[1,2,3], ZHAO Fazhan[1,2,3]

(1. Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, CHN;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN;
3. Key Lab. of Silicon Device and Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, CHN)

Abstract: Based on a comprehensive review of the existing parasitic power supply system, an intelligent multi-channel adaptive control parasitic power supply system without special process support is proposed, which takes into account both high-speed charging and low voltage differential power supply. In this scheme, the state machine of charge and discharge control and the parallel control structure of two devices are used to adaptively control and switch the three power supply lines, so as to improve the charging speed and efficiency, and further blur the power consumption information. The scheme can be used for the power supply of 1-Wire chip, high demand photoelectric information collection and real-time monitoring function chip, and improve the chip's ability to resist side channel attack. Based on the 0.35 μm bulk silicon CMOS process of HHGrace, the simulation results show that the system can reduce the voltage difference between inside and outside the chip to less than 0.1 V, and increase the charging speed by 32%.

Key words: parasitic power supply system; multi-channel power supply; voltage monitoring; adaptive control system; side channel attack

0 引言

寄生供电系统是一种利用通信数据线获取电能，从而为从机设备供电的系统。使用寄生供电系统，无需额外的电源配置端口，降低了系统互联复杂性[1]。该系统常见于美信公司发布的1-Wire芯片系列产品中，被广泛应用在身份认证、温度等环境信息的监测采集和通讯等芯片中[2-4]。该系统还可以

收稿日期：2021－03－10.
基金项目：国家自然科学基金项目(11905287,61874135).
* 通信作者：宿晓慧

在芯片短时掉电后，为报警装置或置位标志位的操作供电，从而用于高要求的光电信号采集以及实时监测系统中，以警示芯片采集的数据存在错误。目前限制寄生供电系统应用的主要因素是较长的恢复时间以及较大的供电压差。

寄生供电系统内置的储能电容作为储能单元，在放电期间消耗的电荷将会在通信数据线（DL）恢复到高电位时得到补充，以便在 DL 传输低电位信号时为从机设备提供短时间供电。寄生供电系统从放电结束到再次充电完成的时间被定义为恢复时间。储能电容的容量越大，供电系统的恢复时间越长。如图 1 所示，如果寄生供电系统可利用的充电时间小于恢复时间，则寄生供电系统的供电电压就会在若干个工作周期后被拉低到从机设备工作所需的最小电压以下，进而影响从机设备的工作。

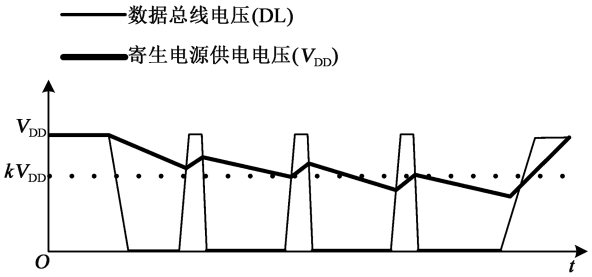


图 1　寄生供电系统供电信号波形图

本文将 DL 传输的高电位信号的电压与寄生供电系统输出的最高供电电压的差值定义为供电压差。将供电系统可提供的最高供电电压与从机设备正常工作所需的最低供电电压的差值定义为电压裕度。较大的供电压差会影响供电系统的储能容量，限制系统供电的电压裕度。随着储能单元放电，系统的供电电压持续降低，为保证从机设备的正常工作，需要限制供电系统掉电的电压裕度，而较大的压差进一步缩减了系统供电的电压裕度。因此迫切需要设计出一种对工艺兼容性强、恢复时间短、供电压差小、储能容量较大的寄生供电系统。

1　现有寄生供电系统

单总线技术自 20 世纪 90 年代末被提出后，便受到广泛关注，多家公司和科研机构陆续提出单总线技术的实现方法，尤其是其核心寄生供电系统的实现方法，并对其性能进行优化。

1.1　美信公司基础型寄生供电系统

美信公司旗下子公司——DALLAS 公司于 1994 年首次提出了一款用于 1-Wire 芯片的寄生供电系统[5]，其由储能电容以及二极管组成结构如图 2 所示。通过二极管实现对储能电容的充电进行控制：在 DL 的电压低于供电电压时，二极管反向偏置，阻断储能电容反向泄电，同时由储能电容放电实现对从机设备供电；在 DL 的电压高于供电电压时，二极管正向导通，对储能电容充电。供电系统为了保证较小的供电压差，采用了特殊的、正向导通压降为 0 的二极管，但是此类器件对工艺的依赖性较高，限制了寄生供电系统的应用场景。

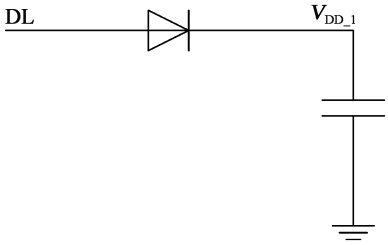


图 2　美信公司寄生供电系统核心供电结构

1.2　科研院校改进型寄生供电系统

复旦大学于 2007 年提出了一种改进型寄生供电系统，如图 3 所示，在主机设备上增加受控上拉电路，在从机设备上增加寄生供电结构。通过增加在充电阶段主机设备提供给供电系统的驱动电流以减小系统恢复时间，采用栅压自举电路产生高压信号来控制图 4 所示寄生供电系统核心结构中的 N 型开关管开启，以减小供电压差。此方法能够提高充电速度，降低供电压差，但是同时改变主机设备与从机设备的结构，限制了供电系统的应用场景。此外同时使用高压器件与低压器件，降低了工艺的兼容性。由于此系统采用 N 型开关管实现充电控制，即使采用高压驱动，依然产生了 0.5 V 的供电压差[6-7]。

此外，上海工程大学在 2012 年提出一种寄生供电系统性能优化方案，只从主机供电的角度提高供电系统充电阶段的驱动电流，能够有效地减小供电系统恢复时间，但是供电压差问题依旧无法解决[8]。2014 年江苏科技大学提出了一种与复旦大学类似的寄生供电系统设计方案，在主机设备上添加自适应上拉电路，在从机设备上添加寄生供电模块，与复旦大学提出的受电模块不同，其采用单稳态电路来驱动 N 型开关管控制储能电容的充放电[9]，此结构能够实现寄生供电功能，但是无法对其供电压差以及恢复时间等性能进行优化。

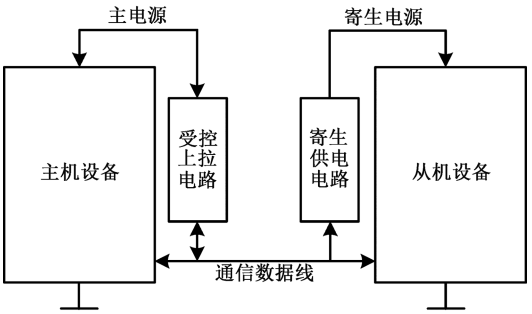


图 3 改进型寄生供电系统

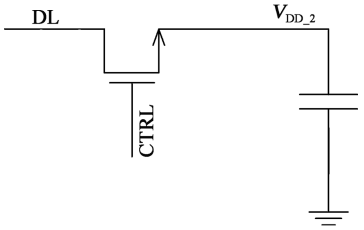


图 4 改进型寄生供电系统核心供电结构

2 多通路自适应调控寄生供电系统

针对上述问题，本文利用多组容值较小的储能电容在较大压差充电时充电速度更快的特点，设计出一种智能多通路自适应调控寄生供电系统。如图 5 所示，该寄生供电系统包含寄生储能供电模块、直接供电控制模块、充电控制模块、放电控制模块。充电控制模块由充电逻辑单元与充电控制比较器组成，放电控制模块由放电逻辑单元、分压单元与放电控制比较器组成。为满足整个系统的供电需求，采用另一个小型寄生供电系统对此供电系统进行单独供电。系统内部的充电逻辑单元与放电逻辑单元为常见的“与”逻辑，即 DL 信号与放大器输出信号逻辑的“与”运算。此外，为保证分压单元不会产生漏电通路，利用反向偏置二极管的大电阻进行分压产生预设电压。此预设电压与芯片 kV_{DD} 相关，kV_{DD} 为芯片正常工作所容许的最小供电电压，其中 k 为比例参数，通常设置为 0.8。

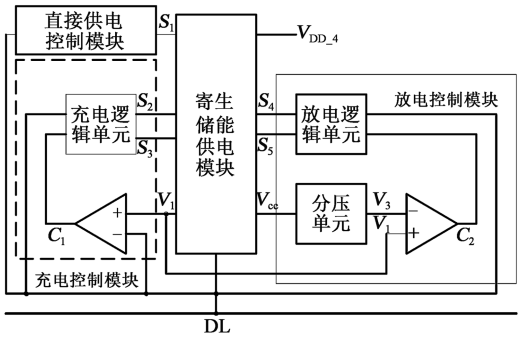


图 5 多通路自适应调控寄生供电系统结构图

2.1 寄生储能供电模块

寄生储能供电模块内置 3 条供电线路：直接供电线路、储能供电线路 V_1 和储能供电线路 V_2。如图 6 所示，直接供电线路使用导通压降较小的 P 型开关管实现供电控制，储能供电线路采用二极管与 P 型开关管并行双控制结构实现对储能电容的充电控制，采用 P 型开关管实现对芯片的放电控制。此外利用稳压电容 C_0 来减小供电通路转换带来的影响。

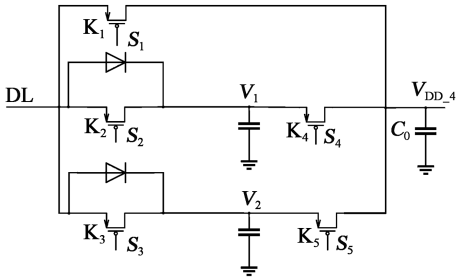


图 6 寄生储能供电模块

寄生储能供电模块对三条供电通路的控制流程如图 7 所示。直接供电控制模块与寄生储能供电模块 K_1 开关管连接，用于在 DL 传输高电平信号时，控制寄生储能供电模块采用数据线 DL 的电压（V_{DL}）为从机设备供电；

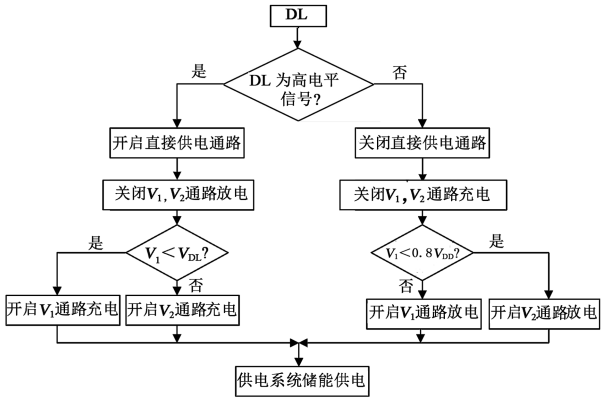


图 7 寄生储能供电模块充放电控制

充电控制模块与寄生储能供电模块开关管 K_2 与开关管 K_3 连接，用于在 DL 的电压信号为高电平且第一储能单元的电压 V_1 小于 V_{DL} 时，控制寄生储能供电模块采用 V_{DL} 为第一储能单元进行高压阶段的充电，并在 DL 的电压信号为高电平且 V_1 等于 V_{DL} 时，控制寄生储能供电模块采用 V_{DL} 为第二储能单元进行高压阶段的充电；采用充电更快的二极管结构进行两个储能单元低压阶段的充电。

放电控制模块与寄生储能供电模块开关管 K_4

和开关管 K_5 连接，用于在 DL 的电压信号为低电平且 V_1 大于 kV_{DD} 时，控制寄生储能供电模块采用第一储能单元进行放电以向从机设备供电，并在 DL 的电压信号为低电平且 V_1 小于或等于 kV_{DD} 时，控制寄生储能供电模块采用第二储能单元进行放电。在整个控制过程中充电通路与放电通路不为同一个通路，使得储能单元在充电阶段不受负载扰动的影响。

2.2　充电控制比较器与放电控制比较器

如图 8 和图 9 所示，充电控制模块与放电控制模块分别采用了结构相同但参数不同的电压比较器，分别实现 V_{DL} 与 V_1 以及 V_1 与 V_3 不同精度的电压比较。充电控制比较器采用阻值较小的 R_1 以及小尺寸 N 管，产生较大的偏置电流以及较小的共源极放大器增益，实现 V_{DL} 与 V_1 电压差值小于 0.012 V 的高精度比较，输出 C_1 的信号。放电控制比较器采用较大阻值 R_2 以及大尺寸的 N 管实现 V_1 与 V_3 的低精度比较，输出 C_2 的信号。

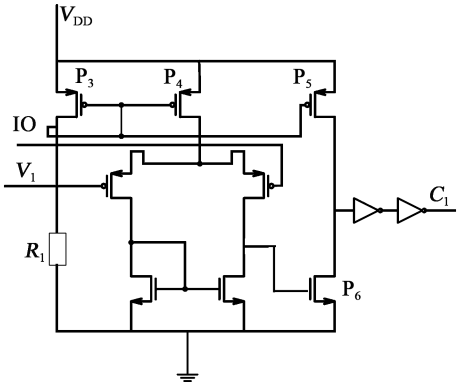


图 8　充电控制比较器

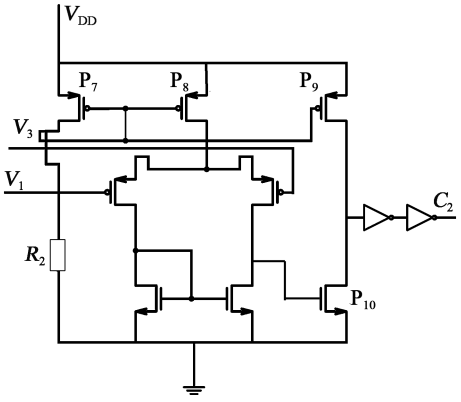


图 9　放电控制比较器

图 10 为充电控制比较器与放电控制比较器的仿真波形图，V_3 与 kV_{DD} 相等，本文设置 k 为 0.8，即 kV_{DD} 约为 2.7 V。C_1 在 V_{DL} 与 V_1 压差为 0.012 V 时输出高电位，控制寄生储能供电模块停止对于第一储能单元的充电，转为对第二储能单元充电。C_2 在 V_1 小于 V_3 时输出低电位，转换为储能供电线路 V_2 进行放电。

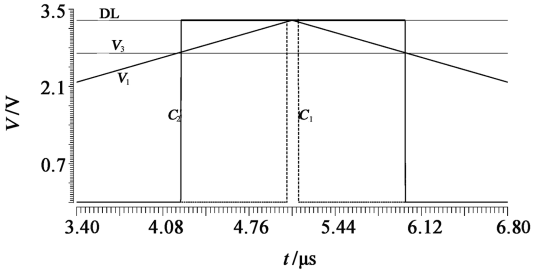


图 10　充电控制比较器与放电控制比较器仿真结果

2.3　对照组寄生供电系统核心电路

为验证智能多通路自适应调控寄生供电系统对供电性能的优化效果，设计如图 11 所示的供电系统。采用 P 型开关管与二极管并行控制的结构，控制储能单元充电。在低压充电阶段通过二极管进行快速充电，在高压充电阶段，通过 P 型开关管保证低压差供电。

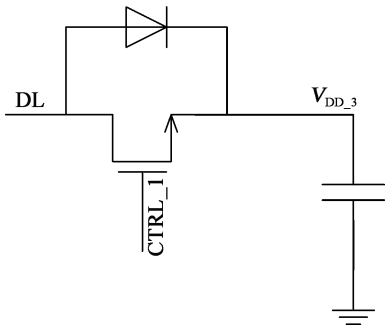


图 11　对照组寄生供电系统核心电路

3　供电系统性能仿真对比验证

3.1　寄生供电系统仿真验证

为了验证上述系统的可行性，本文基于 0.35 μmCMOS 工艺搭建了上述寄生供电系统并进行了仿真验证。由于从机设备的功能多变且复杂，因此采用阻值为 33 kΩ 的电阻作为负载模块。主机设备采用 3.3 V 进行供电，负载的电流为 100 μA。为了对比各寄生供电系统的供电性能，本文控制各系统总储能电容值相同，各开关管与二极管的参数相同。

图 12 为多通路自适应调控寄生供电系统的仿真结果，整个过程分为充电阶段、放电阶段以及恢复阶段，通过仿真结果可以看出，充电电压约为

3.3 V,充电压差在 100 mV 以下,供电电压维持在 2.7～3.3 V。

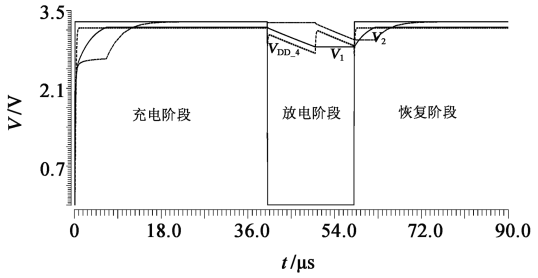


图 12 多通路自适应调控寄生供电系统仿真结果

图 13 为基础型寄生供电系统(V_{DD_2})、改进型寄生供电系统(V_{DD_1})、对照组寄生供电系统(V_{DD_3})以及多通路自适应调控寄生供电系统(V_1,V_2)充电阶段的仿真结果,V_1 和 V_2 为多通路供电寄生供电系统的两组储能单元的电压。通过仿真结果可以看出,V_{DD_1} 与 V_{DD_3} 的充电速度小于 V_1 和 V_2 的充电速度,V_{DD_2} 的供电压差远大于其他寄生供电系统。

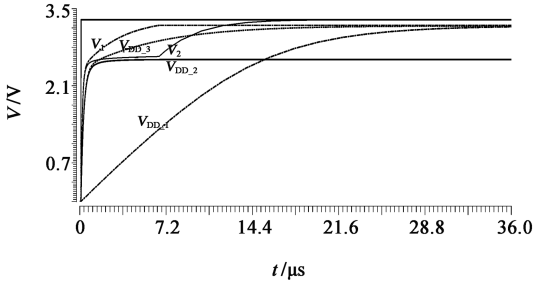


图 13 充电速度对比仿真结果

将上述仿真结果中寄生供电系统的充电时间、恢复时间以及供电电压提取出,得到结果如表 1 所示。将多通路供电寄生供电系统供电信号定义为 V_{DD_4},并定义其储能单元 V_1 和 V_2 都完成充电后的时间为充电时间。从表 1 可以看出多通路供电寄生供电系统的充电时间可优化 32%,实现供电压差为 12 mV。

表 1 寄生供电系统供电系统供电性能

供电系统供电信号	供电电压/V	充电时间/μs	恢复时间/μs
V_{DD_1}	3.17	38.39	18.42
V_{DD_2}	2.56	3.89	2.87
V_{DD_3}	3.17	24.37	18.42
V_{DD_4}	3.288	18.39	12.42

3.2 寄生供电系统关键器件参数计算

为保证寄生供电系统模块中的储能电容能够满足从机设备对于供电电流、供电电压、通信速度等的要求,需要计算出合理的储能电容容量。图 14 是储能电容的充放电波形,电容的充电时间为 t_p,t_p 到 t_q 的时间为寄生供电系统模块内储能电容放电时间。放电期间从机正常工作所需的最大负载电流为 I_{load}。根据电容充放电公式,可得关系式(1):

$$C \times (1-k)V_{DD} = I_{load} \times (t_q - t_p) \quad (1)$$

此外,为满足寄生供电系统的充电速度性能对于主机驱动的要求,需计算出主机所需提供的最小驱动电流 I_{drive}。按照电容的充放电公式,可得关系式(2):

$$C \times (1-k)V_{DD} = I_{drive} \times t_p \quad (2)$$

通过上述式(1)与(2)可确定储能电容值 C 以及主机设备所提供的最小驱动电流 I_{drive}。以单总线接口型芯片为例,单总线接口型芯片的恢复时间 t_{REC} 的范围为 5 μs 以下,为保证芯片正常工作,寄生供电系统模块需要在 t_{REC} 时间内完成芯片的再充电,即 t_p 需要小于 t_{REC}。芯片低电平的时间范围为 1～120 μs,为保证芯片的供电要求,需要保证 t_p 到 t_q 的时间大于芯片的低电位的最长时间。芯片内部的功耗电流 I_{load} 为 10 μA 以上。通常供电电压允许的最大误差为 10%,供电电压设置为 3.3 V。计算出所需电容值约为 3 nF,所需驱动电流约为 200 μA。

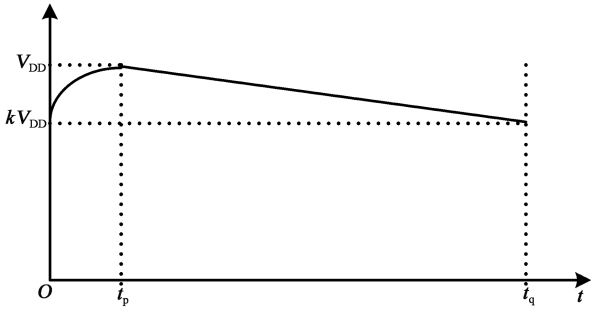


图 14 储能电容的充放电波形

4 总结

本文总结了现有寄生供电系统的实现方法及其优缺点,提出了一种无需特殊工艺支持、可兼顾高速充电和低压差供电的智能多通路自适应调控寄生供电系统。该系统采用充放电控制状态机,协同双器件并行控制结构,对供电系统内置的 3 条供电线路进行自适应调控,提升充电速度和供电效率。此外,本文构建了对比系统,用于对该系统的充电时间、恢复时间以及供电电压差等性能进行对比验证。基于华虹宏利 0.35 μm 体硅 CMOS 工艺模型完成了该系统仿真验证,结果表明智能多通路自适应调控寄生

供电系统的供电压差约为 12 mV，充电速度优化 32%。工艺兼容性的增强以及性能的提升，拓展了寄生供电系统的应用方向，可用于多种高要求的信号采集以及实时监控等场景。

此外该系统可以在不增加接口的情况下，在充电过程中增加三次启动功耗，以模糊芯片的功耗与时间信息的关联性，增加了芯片抵抗侧信道攻击的能力。

参考文献：

[1] 苏　镇，郭　赣. 关于通过单总线供电的研究[J]. 通信电源技术，2004，21(4)：28-30.
Su Zhen，Guo Gan. Research on power supply through single bus[J]. Telecom. Power Technol.，2004，21(4)：28-30.

[2] 朱　熙，郭　赣. 航天器温度数字测量系统的多机通信[J]. 航天器环境工程，2011(5)：477-481.
Zhu Xi，Guo Gan. Multi-computer communication of spacecraft digital temperature measurement system [J]. Spacecraft Environment Engineering，2011(5)：477-481.

[3] Koziore，Jiri. Temperature measurement in boreholes by programmable logic controler B&R and temperature sensors 1-WIRE[C]// IEEE Inter. Conf. on Programmable Devices and Embedded Systems，2012，45(7)：382-387.

[4] 唐为义，王艳霞，刘　蕾. 便携式多点温度采集系统[J]. 仪表技术与传感器，2007(11)：50-51，54.
Tang Weiyi，Wang Yanxia，Liu Lei. Portable multipoint temperature acquisition system[J]. Instrument Technique and Sensor，2007(11)：50-51，54.

[5] Cusey J P. Portable electronic module having EEPROM memory，systems and processes：USA，5679944[P]. 1994-11-18.

[6] 王峻松，朱潇挺，任腾龙，等. 一种改进的寄生供电串行通信总线及其收发器[J]. 微电子学，2007，37(6)：882-886.
Wang Junsong，Zhu Xiaoting，Ren Tenglong，et al. A new parasite powered serial bus and its transceiver [J]. Microelectronics，2007，37(6)：882-886.

[7] 王峻松，朱潇挺，任腾龙，等. 一种提高 1-WIRE 寄生供电容量的方法[J]. 微电子学与计算机，2008，25(1)：112-115.
Wang Junsong，Zhu Xiaoting，Ren Tenglong，et al. A method to improve parasitic power supply capacity of 1-WIRE[J]. Microelectronics & Computer，2008，25(1)：112-115.

[8] 隋斌雁. 一种温度传感器的寄生供电系统上拉供电电路：中国，201220682365.3[P]. 2012-12-12.
Sui Binyan. A pull up power supply circuit of parasitic power supply for temperature sensor：CHINA，201220682365.3[P]. 2012-12-12.

[9] 房淼淼. 一种高性能的寄生供电方法[J]. 现代电子技术，2014(19)：66-68.
Fang Miaomiao. A method of improving parasite power supply capability of 1-WIRE[J]. Modern Electronics Technique，2014(19)：66-68.

作者简介：

高　鹤(1992－)，男，硕士研究生，主要从事身份认证芯片设计技术方向研究工作；

宿晓慧(1986－)，女，博士，助理研究员，主要从事高可靠芯片设计技术方向的研究工作。

(上接第 394 页)

[15] Xian S，Nie L，Qin J，et al. Effect of oxygen stoichiometry on the structure，optical and epsilon-near-zero properties of indium tin oxide films[J]. Opt. Express，2019，27(20)：28618-28628.

[16] Wang H，Dai X，Du K，et al. Tuning epsilon-near-zero wavelength of indium tin oxide film via annealing[J]. J. of Phys. D：Appl. Phys.，2020，53(22)：225108.

[17] Wang Y，Capretti A，Dal Negro L. Wide tuning of the optical and structural properties of alternative plasmonic materials[J]. Optical Materials Express，2015，5(11)：2415-2430.

[18] Hong R，Yan T，Tao C，et al. Laser induced the tunable permittivity of epsilon-near-zero induced in indium tin oxide thin films[J]. Optical Materials，2020，107：110137.

[19] Terzini E，Thilakan P，Minarini C. Properties of ITO thin films deposited by RF magnetron sputtering at elevated substrate temperature[J]. Materials Science and Engineering B，2000，77(1)：110-114.

作者简介：

周江昊(1994－)，男，2017 年毕业于厦门大学物理学专业，硕士研究生，主要研究方向为微纳光学和非线性光学；

陈溢杭(1979－)，男，博士，教授，主要从事光子晶体、微纳光学的研究。