

微电子器件可靠性

Reliability of Microelectronic Devices

西安电子科技大学 XIDIDIAN UNIVERSITY

V2.0 © 2007 韩孝勇 Han XiaoYong

xyhan5151@yahoo.com.cn www.dianzichan.com

第十三次课 使用可靠性

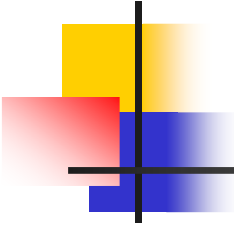
第十二次课 使用可靠性

- 1.概述
- 2.元器件质量等级
- 3.降额应用
- 4.防浪涌应用
- 5.防静电应用
- 6.防闩锁应用
- 7.防辐射应用
- 8.保护元件

✓ 本次要点:

降额应用 防浪涌应用
防静电应用 防闩锁应用
防辐射应用





1.应用可靠性概念

什么是应用可靠性？

■ 概念

- 固有可靠性：器件制造完成时所具有的可靠性，取决于器件的设计、工艺和原材料
- 应用可靠性：器件用于整机系统时所具有的可靠性，与器件的工作与非工作条件有关

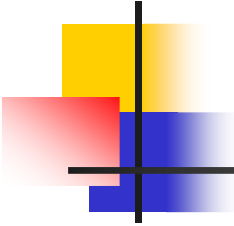
■ 比较

- 应用可靠性>固有可靠性：整机设计时采取了降额、冗余、容错等措施（“三类元件装出一类整机”）
- 应用可靠性<固有可靠性：整机装配时器件受到了不当应力或误操作的作用（“一类元件装出三类整机”）

1. 应用可靠性概念

使用应力对器件可靠性的影响

应力类别	应力形式	失效场合	主要失效模式
电应力	静电、浪涌、过电压、噪声	工作、安装、测量	栅击穿（MOS器件） pn结短路（双极器件） 二次击穿（功率管） 闩锁失效（CMOS电路）
温度应力	高温、低温、温度循环	大功率工作、间歇工资、高寒地区、焊接	热击穿、热疲劳、参数漂移、密封性失效、键合压焊不良
机械应力	振动、冲击、加速度	安装、运送、航天器、航空器、移动设备	管壳漏气、管芯裂纹、引线断裂
气候应力	高湿度、盐雾、气压	储存、海上、沿海、亚热带地区	外引线腐蚀、芯片金属化腐蚀、电参数劣化



1.应用可靠性问题

日益严重

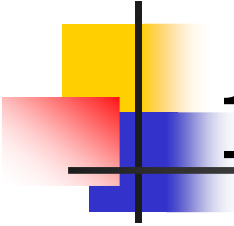
■ 统计数据（资料来源：航天部失效分析中心）

在电子设备现场失效中，元器件失效约占**50%**，其中元器件选用不当的又占**30~50%**。

年份	1989	1990	1991	1992	1993
使用失效比例	61%	40%	56%	45%	46%

■ 产生后果

- 即时失效：影响整机装配的合格率及成本，比较直观
- 潜在失效：影响整机寿命及环境适应能力，比较隐蔽



1. 应用可靠性问题

元器件使用不当的情况

■ 元器件选择

- 只考虑功能与性能指标，未考虑可靠性与质量指标
- 企业提供的可靠性指标与实际产品不符
- 不了解元器件的环境适应性、失效模式、质量保障水平

■ 元器件使用

- 不了解元器件对使用环境的要求
- 不了解元器件的应力容限
- 不了解元器件的安装操作规范

1. 应用可靠性问题

解决途径

■ 器件制造方

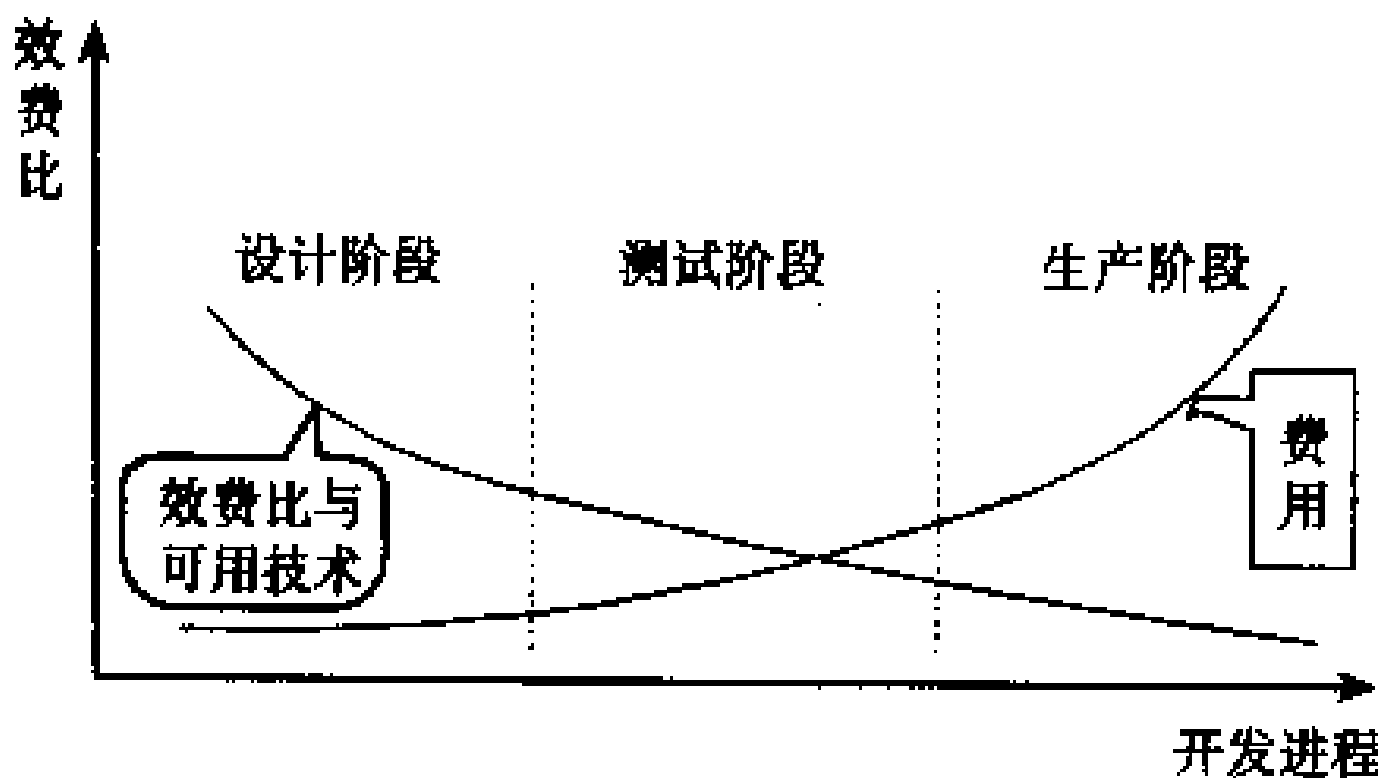
- 提高器件对非常规的工作应力的抵抗力
- 提高器件对非常规的非工作应力的抵抗力

■ 器件使用方

- 正确地选用器件
- 控制器件的工作条件：线路设计、结构设计、热设计等
- 控制器件的非工作条件：装配、储存、运输、测量等



1. 应用可靠性问题 可靠性设计是关键

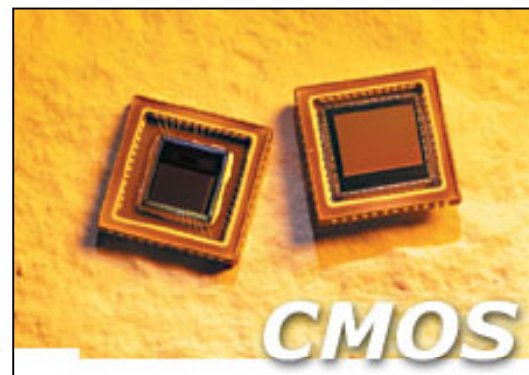


1. 应用可靠性问题

易产生问题的器件

■ 对外界应力敏感的器件

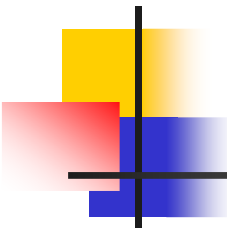
- CMOS电路：对静电、闩锁、浪涌敏感
- 小信号放大器：对过电压、噪声、干扰敏感
- 塑料封装器件：对湿气、热冲击、温度循环敏感



■ 工作应力接近电路最大应力的器件

- 功率器件：功率接近极限值
- 高压器件：电压接近极限值
- 电源电路：电压和电流接近极限值
- 高频器件：频率接近极限值





2. 元器件质量等级

国产元器件的质量规范

■ 质量与可靠性标准

- 国家标准GB
- 国家军用标准GJB
- 电子行业标准SJ
- 七专技术条件QZT（专批、专技、专人、专机、专料、专检、专卡，QZJ8406）

■ 质量与可靠性规范

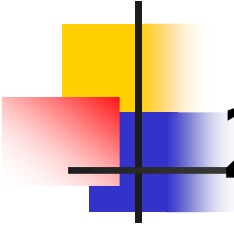
- 中国军用电子元器件合格产品目录（JQPL）
- 中国军用电子元器件合格制造厂一览表（JQML）
- 中国电子元器件质量认证委员会认证合格产品（IECQ）
- 优选元器件清单（PPL，如美国军用电气、电子、机电元件清单MIL-STD-975M）
- 使用规范与用户手册

2. 元器件质量等级

国产集成电路质量等级

- **A级（特军级）**
 - A2级：单片0.1
 - A3级：单片0.25，混合0.5
- **B级（普军级）**
 - B1级：单片0.5，混合1.0
 - B2级：单片1.0，混合3.0
- **C级（民用级）**
 - C1级：单片4.0，混合8.0
 - C2级：单片14.0（塑料封装）





2. 元器件质量等级

美国集成电路的质量等级

■ 宇航级

- S级: 0.25
- S-1: 0.75

■ 军用级

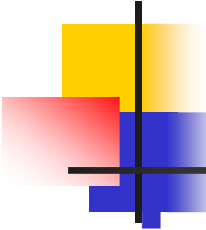
- B级: 1.0
- B-1级: 2.0
- B-2级: 5.0

■ 民用级

- D级: 10.0
- D-1级: 20.0

工作温度范围

- 军用: $-55\sim+125^{\circ}\text{C}$
- 工业用: $-40\sim+85^{\circ}\text{C}$
- 商业用: $0\sim+70^{\circ}\text{C}$



3. 元器件降额使用

微电子器件的最大额定值

定义

- 极限参数
- 器件使用时的工作条件及环境条件的最大允许值
- 功能约束+可靠性约束

■ 分类

- 电流最大额定值：极限电流
- 电压最大额定值：击穿电压
- 温度最大额定值：最高允许结温(塑料封装 $125\sim 150^{\circ}\text{C}$ ，金属封装 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ ，化合物器件 $150\sim 175^{\circ}\text{C}$)，最低允许结温($0\sim -55^{\circ}\text{C}$)
- 功率最大额定值：取决于最高允许结温和热阻

■ 注意

- 工作额定值与最大额定值之间应留有充分的余量
- 用户不要直接测试最大额定值
- 多个参数不要同时接近最大额定值

3. 元器件降额使用

微电子器件的降额使用

原理

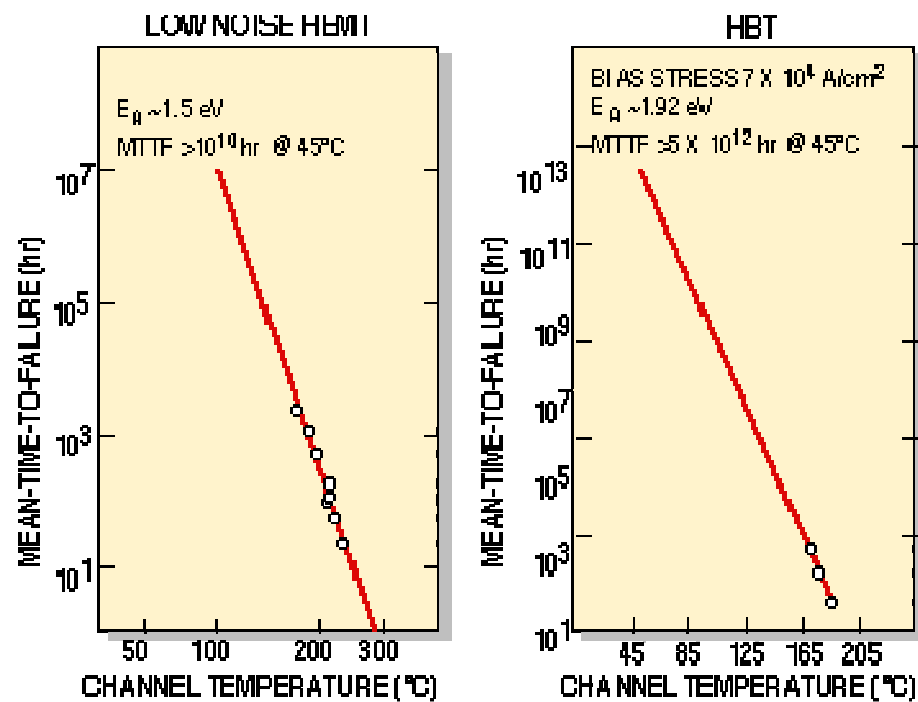
- 工作温度每上升 10°C ，器件的退化速率增加1倍
- 使用功率降低到额定功率的 $1/2$ ，器件失效率降低为额定失效率的 $1/4$

方法

- 工作应力 $<$ 额定应力
- 线路设计（电降额）
- 结构设计（热降额）

作用

- 延长寿命
- 提高抵抗过应力的安全余量



3. 元器件降额使用

降额应合理(1)

■ 合理选择降额等级

降额等级	可靠性改善程度	应用场合	典型应用场合	设备可维修性	设计难度
I级	最大	失效将导致人员伤亡或装备与保障设施的严重破坏	宇航及导弹系统	无法维修或不宜维修	最大
II级	较大	失效将导致装备与保障设施的破坏	航空设备	维修费用较高	较大
III级	中等	失效不会导致人员伤亡或装备与保障设施的破坏	地面设备	可迅速、经济地维修	较小

■ 合理选择降额参数

- 提高寿命：最高允许结温
- 抵抗浪涌应力：电压，电流
- 抵抗热应力：温度范围，最高允许结温，电流
- 抵抗潮湿应力：温度范围



3. 元器件降额使用

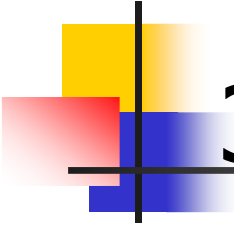
降额应合理(2)

■ 合理选择降额因子

- 降额因子一般为0.7-0.8，不宜<0.5
- 降额过度的后果
 - 增加了整机的成本、体积和重量
 - 增加了设计难度
 - 减少了电路的动态范围
 - 引入 新的失效机理
- 降额过度的实例
 - 功率双极晶体管：电流降额过度使 h_{FE} 显著下降
 - 塑料封装器件：功率降额过度使湿气的影晌上升
 - 电子管：灯丝电压降额过度使阴极表面杂质吸附严重

■ 遵循标准

GJB/Z35 《元器件降额准则》



3. 元器件降额使用

降低结温的途径

- **功耗降额** 选用耗散功率大的器件（分立器件）
- **电流电压降额** 通过电流、电压降额来实现结温降额（小功率器件）
- **热阻降额** 改善散热条件，必要时采用风冷或水冷（功率器件）
- **负载降额** 减少输出或输入载荷（VLSI）
- **频率降额** 降低时钟频率（微处理器）

4. 防浪涌应用

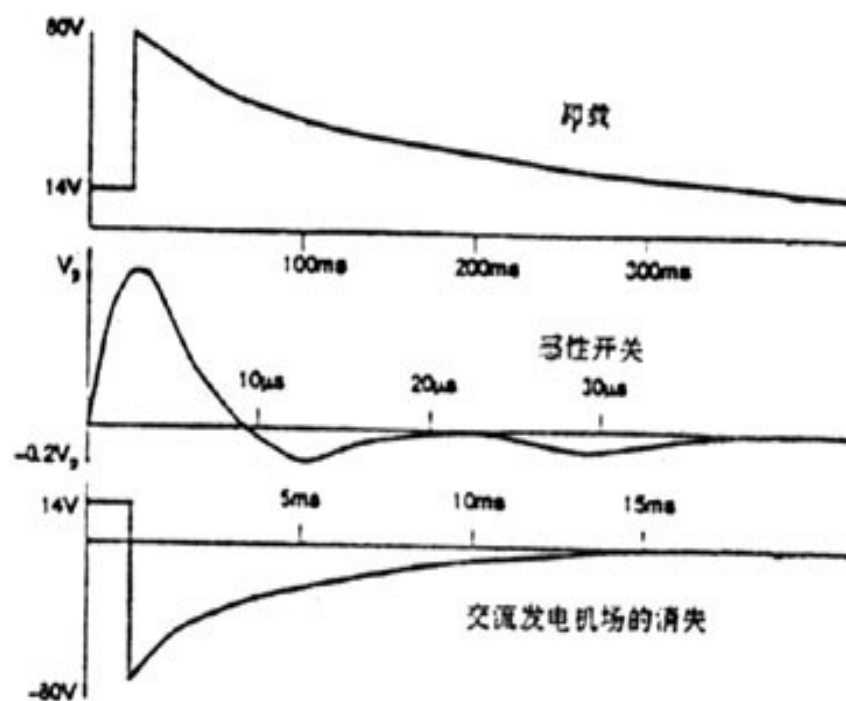
什么是浪涌？

■ 浪涌的特征

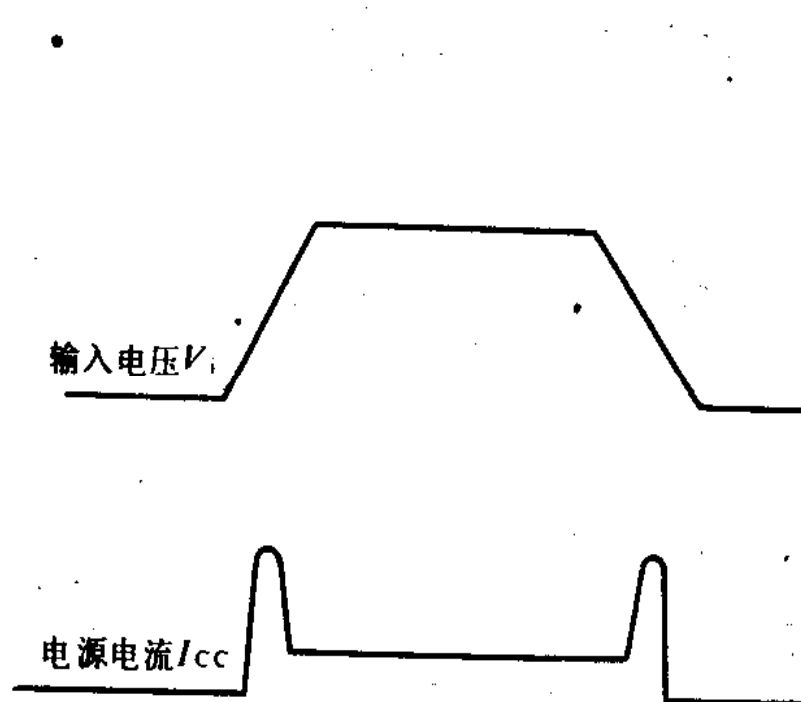
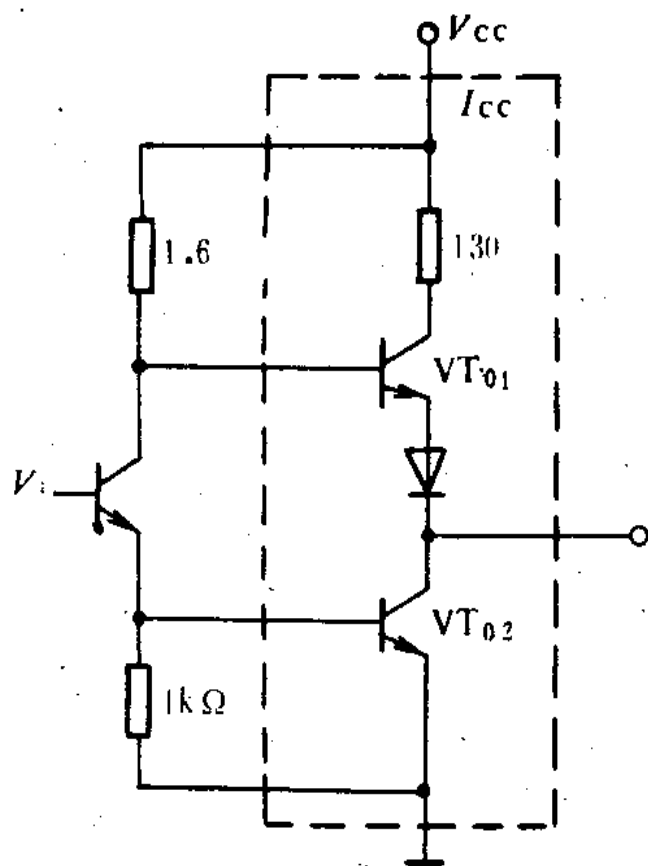
- 瞬时高电压或瞬时强电流
- 平均功率不大，瞬时功率不小

■ 浪涌的作用

- 轻：逻辑电路误动作，模拟电路参数漂移
- 中：潜在损伤，寿命缩短，抗应力能力下降
- 重：即时失效或烧毁

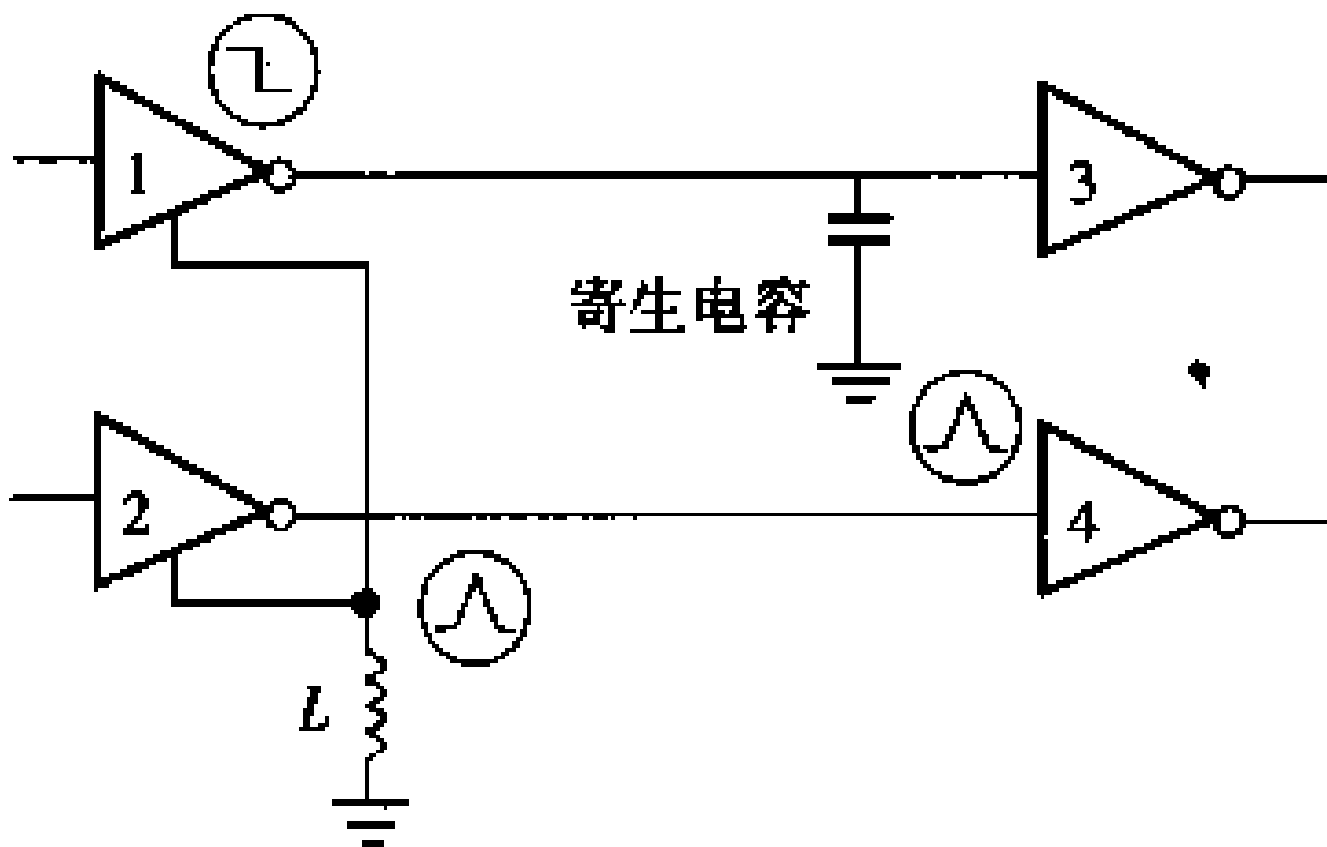


4. 防浪涌应用 数字IC状态转换产生浪涌电流



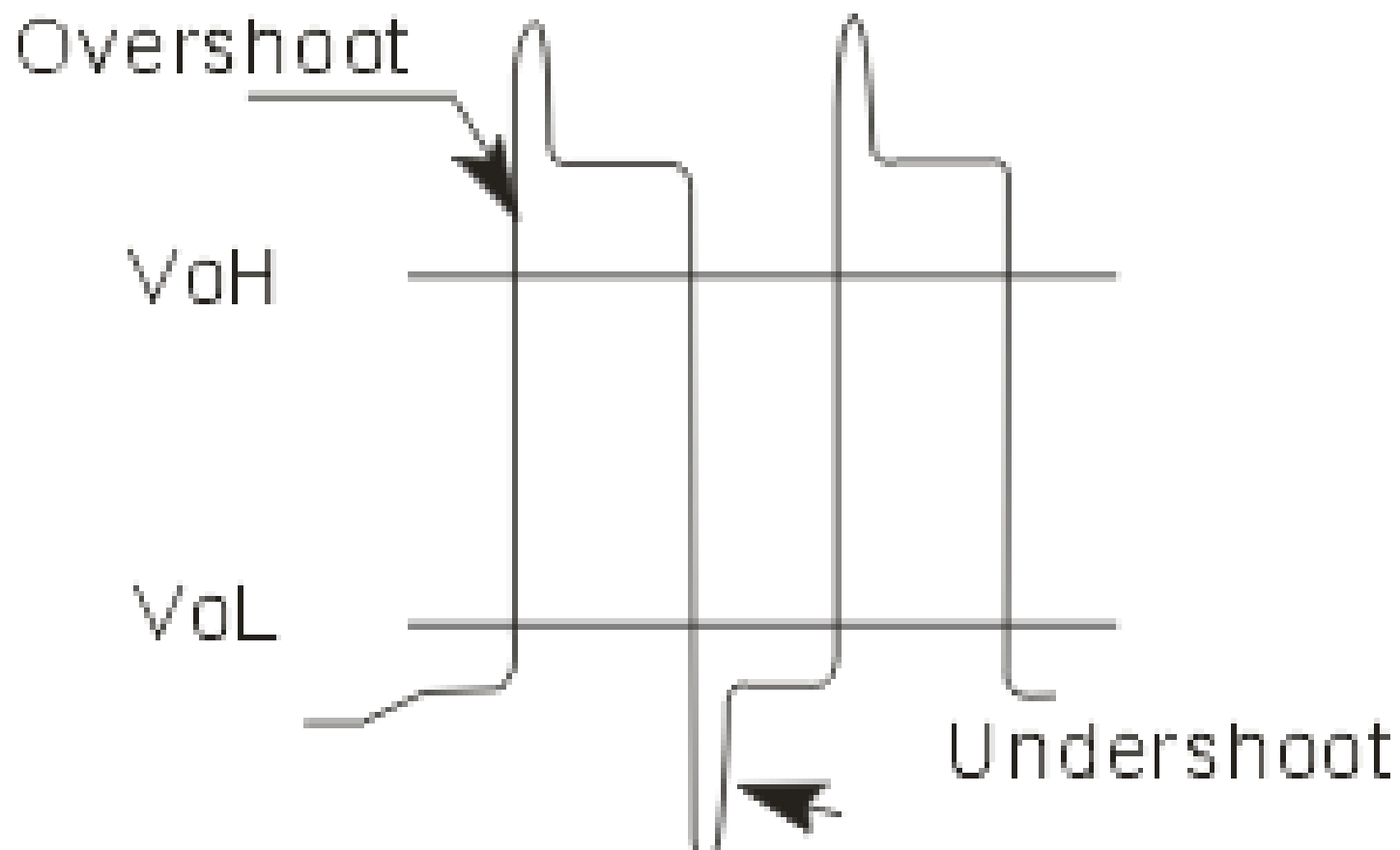
- 浪涌脉冲宽度: 10ns
- 浪涌脉冲高度: 双极 10mA/每门, CMOS 100uA/每门

4. 防浪涌应用 数字IC冒险竞争产生浪涌电流



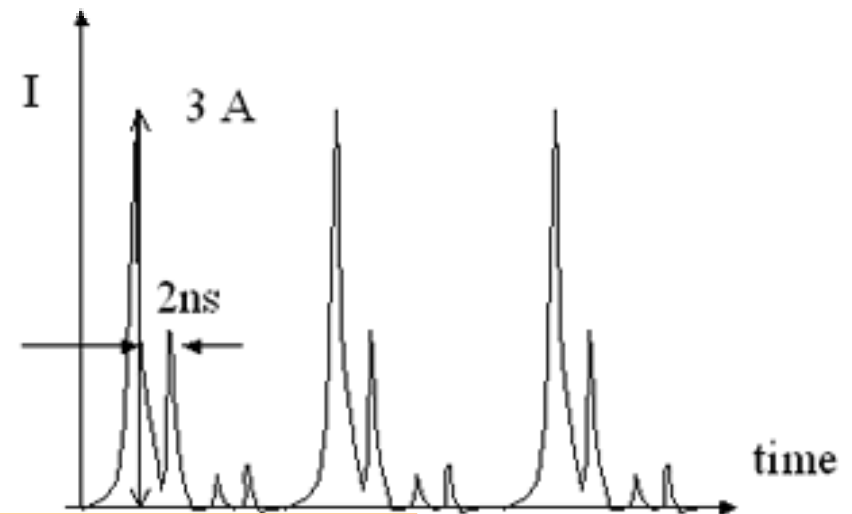
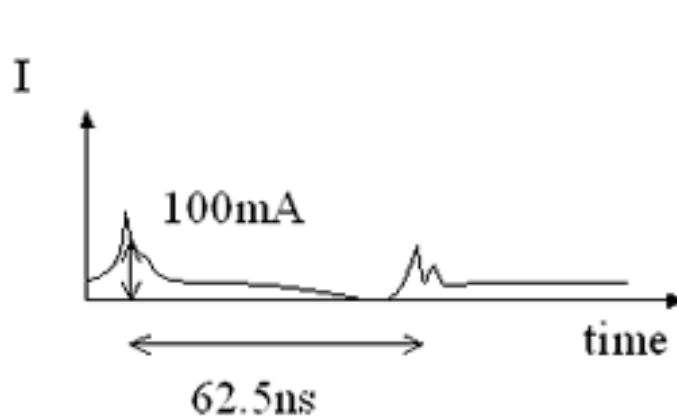
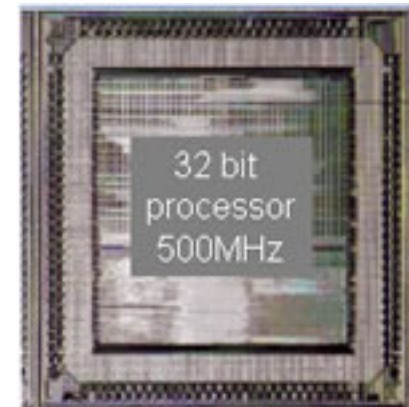
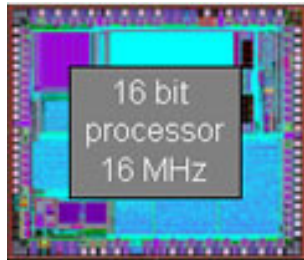
4. 防浪涌应用

过冲或欠冲产生浪涌



4. 防浪涌应用

VLSI的电源浪涌电流

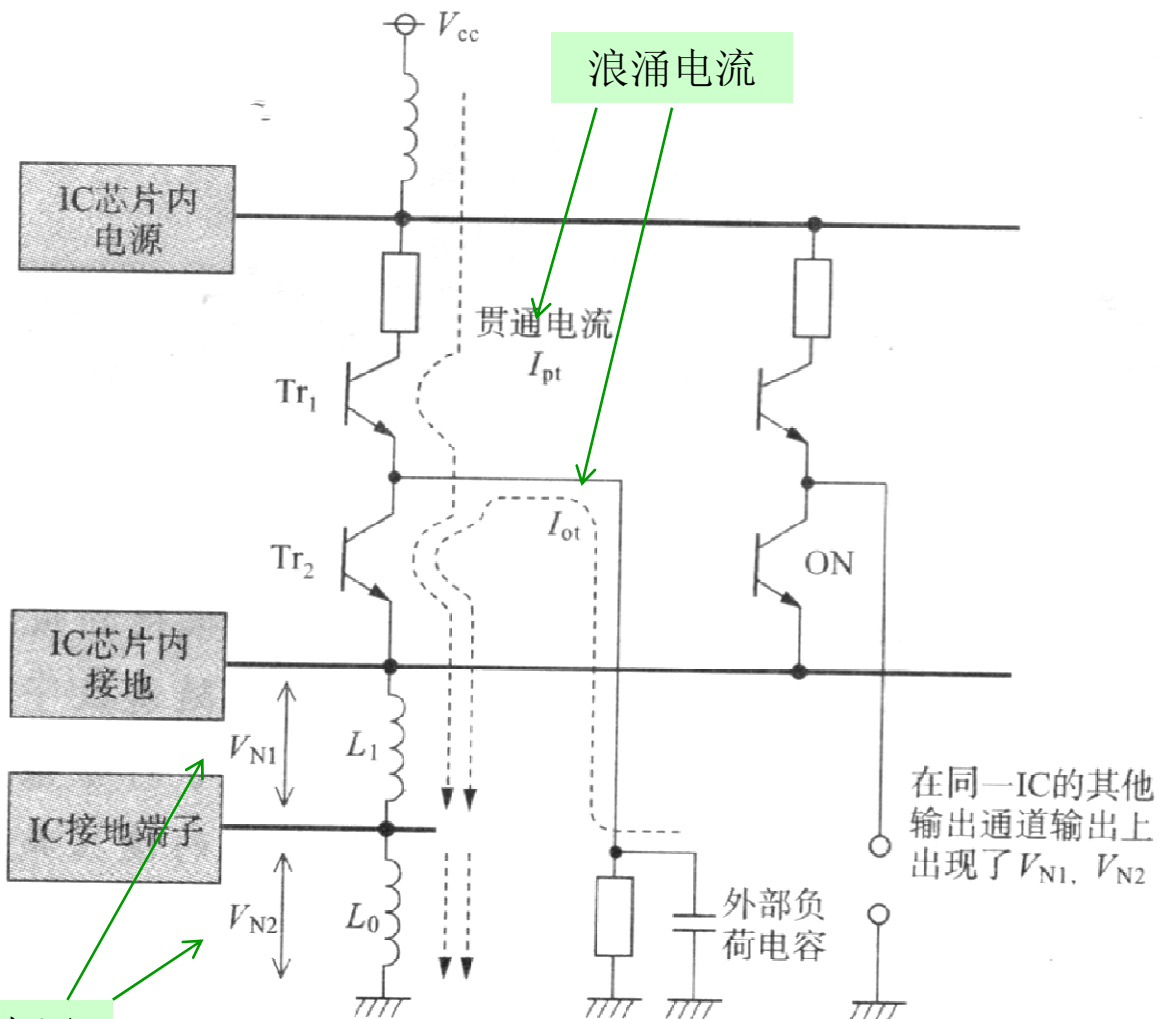


IC集成规模 $\uparrow$ →同时翻转的门数 $\uparrow$ →浪涌电流幅度 $\uparrow$

IC工作频率 $\uparrow$ →过渡区越陡→浪涌脉冲间隔 $\downarrow$

4. 防浪涌应用

浪涌电流→浪涌电压



■ 浪涌电流

- 开关过渡电流 I_{pt}
- 对负载电容充电电流 I_{ot}

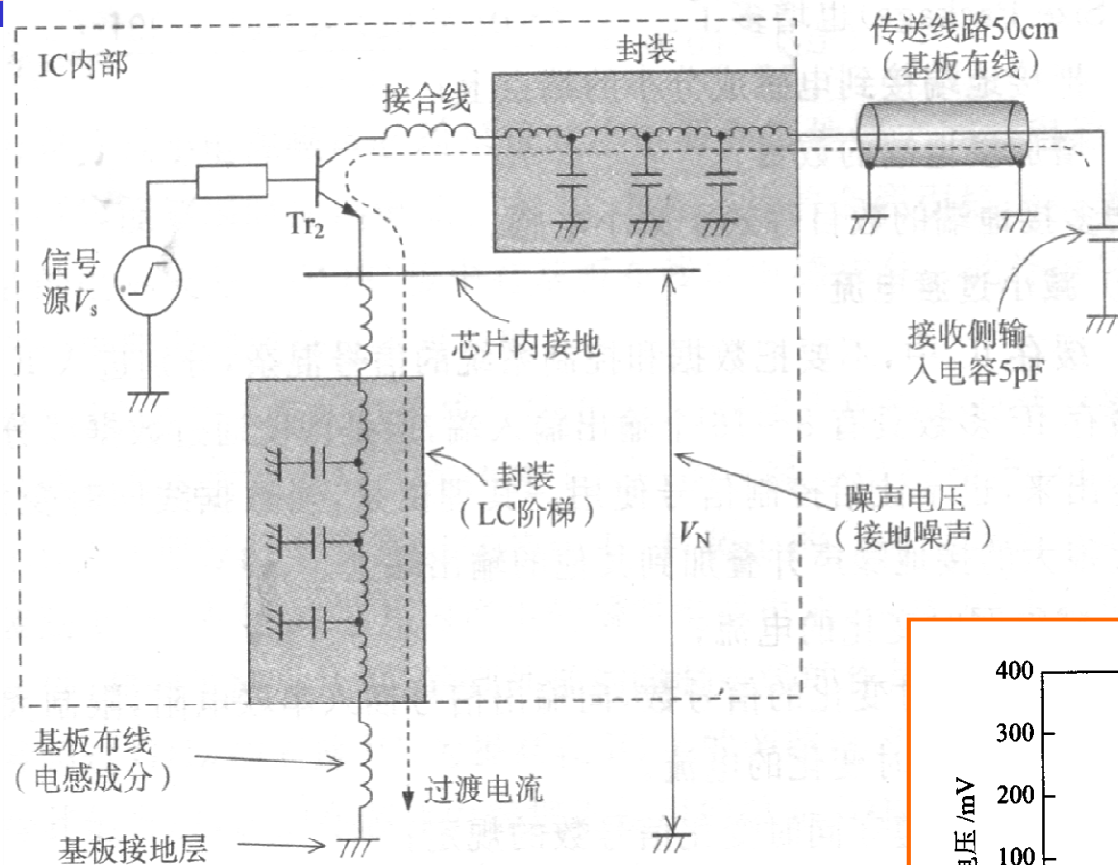
■ 浪涌电压

- 在芯片封装寄生电感上的浪涌电压 V_{N1}
- 在PCB布线寄生电感上的浪涌电压 V_{N2}

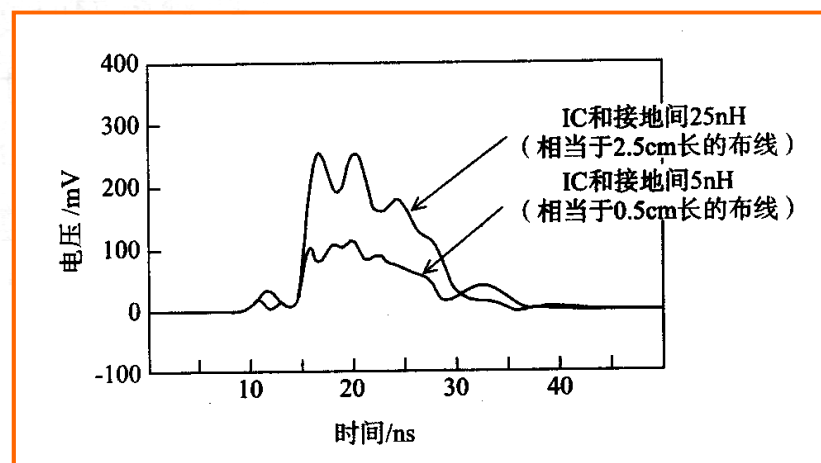
浪涌电压

4. 防浪涌应用

SPICE仿真结果



对负载电容充电的浪涌电流通过封装及PCB寄生电感形成的电压变化





4. 防浪涌应用

数字IC浪涌的抑制方法

■ 芯片内

- 采用电感成分小的封装：小型>大型，
CSP>BGA>QFP>DIP

球栅格阵列(BGA)芯片级封装(CSP)通四方扁平L引脚封装(QFP)

DIP(Dual In-line Package)双列直插形式封装

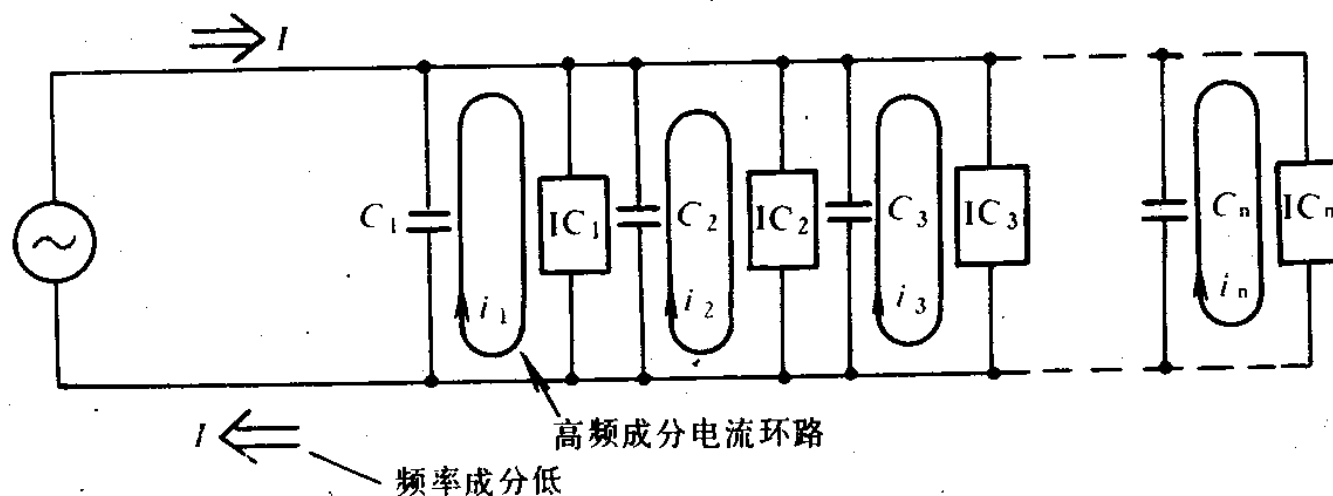
- 增加接地端的数目
- 限制输出电路的电流变化率

■ 芯片外

- 采用旁路电容
- 尽量减少PCB板电源线的电感成分
- 限制IC端子同时变化的信号数，尽量不要使多个输入数据线同时变化

4. 防浪涌应用

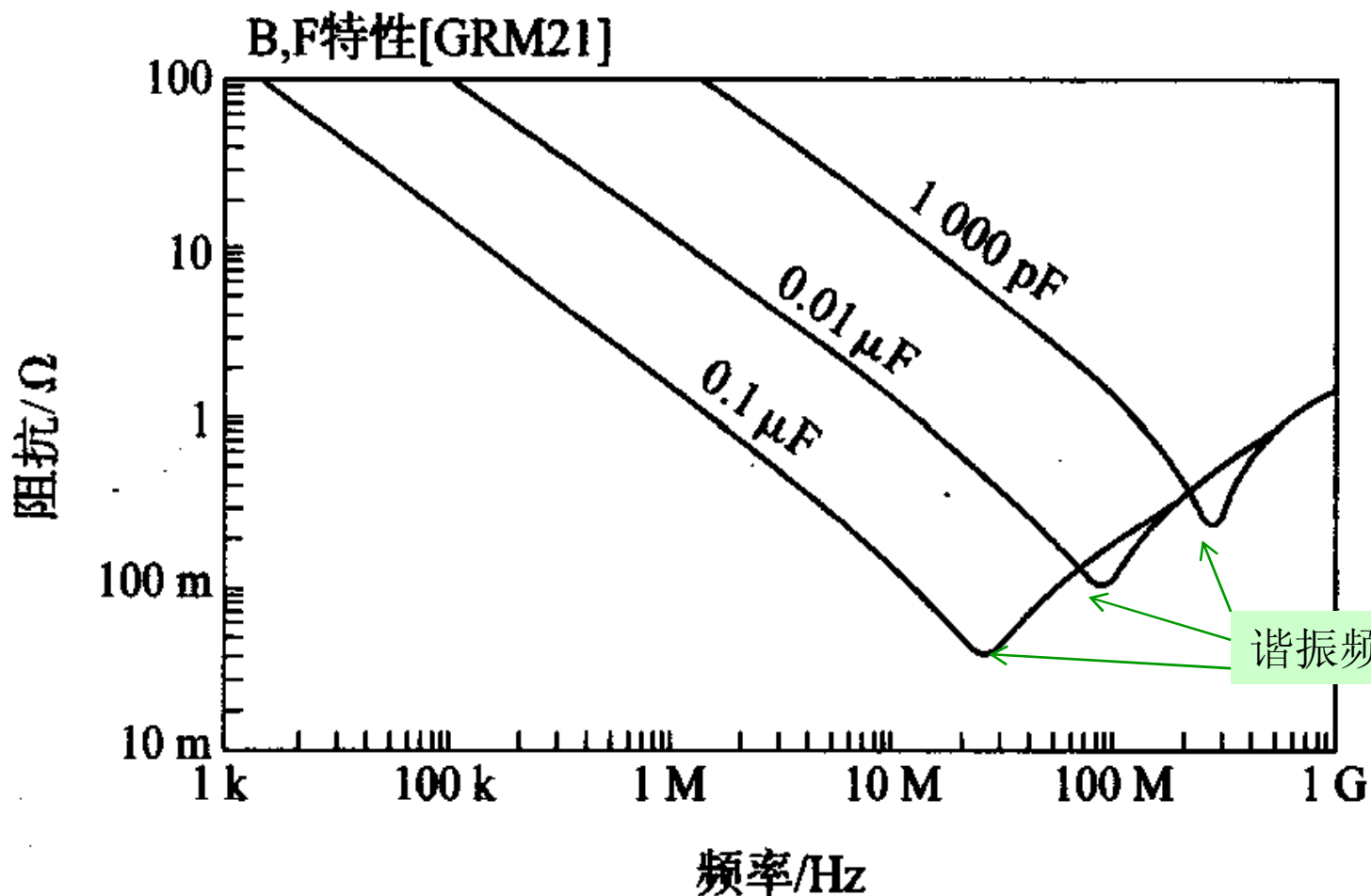
旁路电容的接法



- CMOS电路：每使用10~15块CMOS电路（或单块大规模电路），接一个0.01~0.1 μ F电容对电源进行去耦
- 双极电路：每使用5~10块TTL电路（或线性电路），接一个0.01~0.1 μ F电容对电源进行去耦
- 去耦电容尽可能接近IC。每块PCB也应用一块更大容量的电容去耦。电容应为低电感、高频特性良好，片式，非层式或卷式

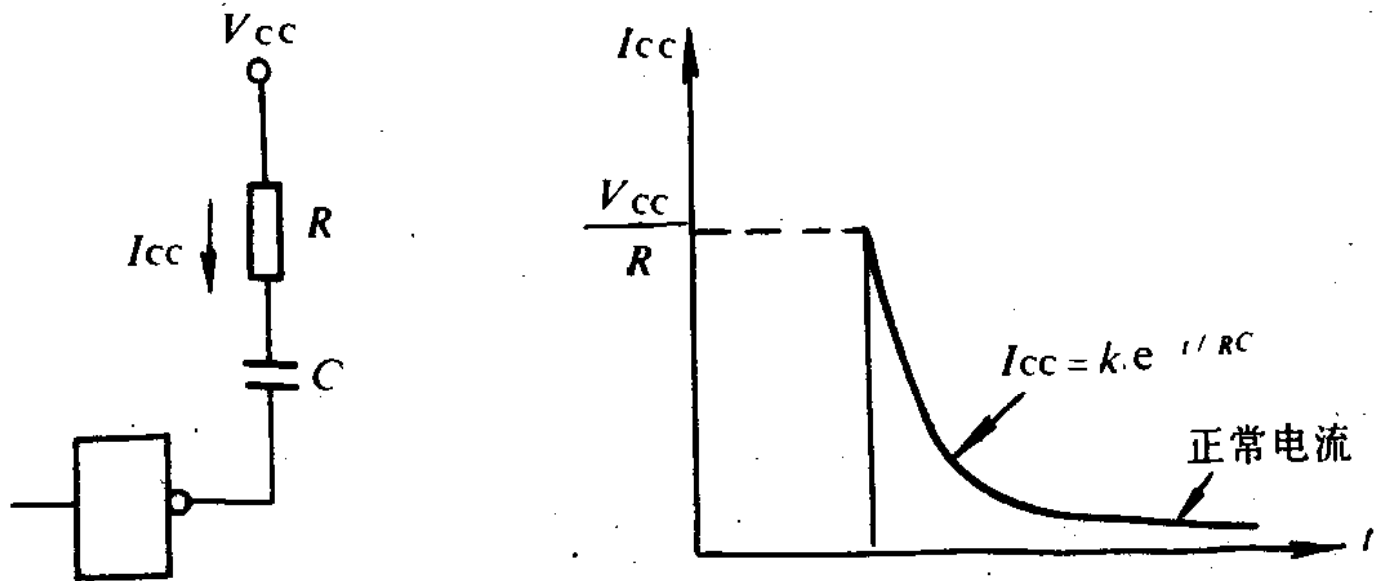
4. 防浪涌应用

旁路电容的特性



片型层积陶瓷电容单体的频率特性

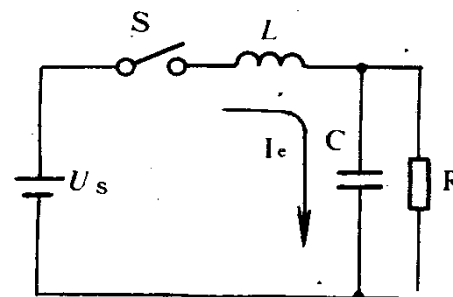
4. 防浪涌应用 接通容性负载时产生的浪涌电流



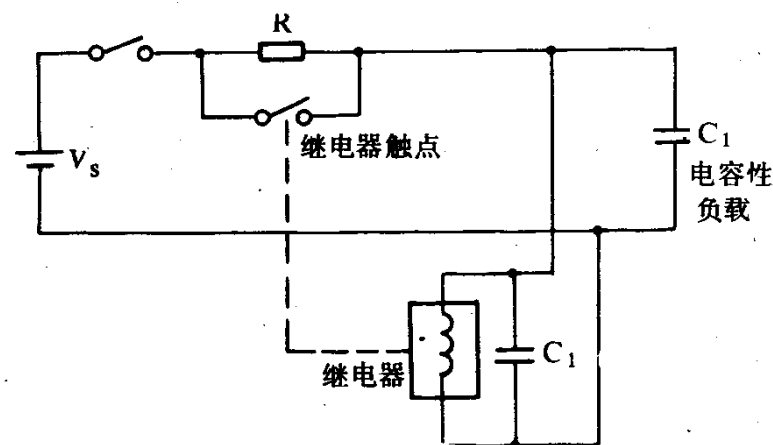
- 输出从高电平向低电平瞬时转换时出现
- 电容越大，过渡期越长
- TTL电路与CMOS电路均有可能产生

4. 防浪涌应用 容性负载产生浪涌的抑制方法

- 接入限流电感，但影响电路速度
- 电容负载接通后自动断开限流电阻或电感，但电路复杂

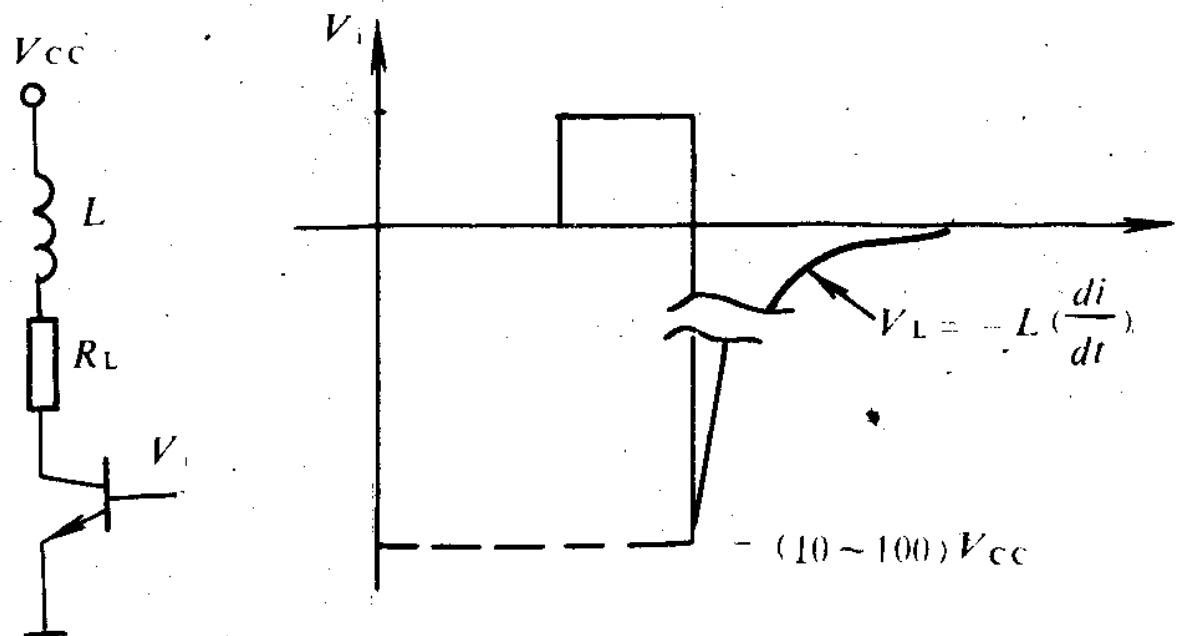


(a)



(b)

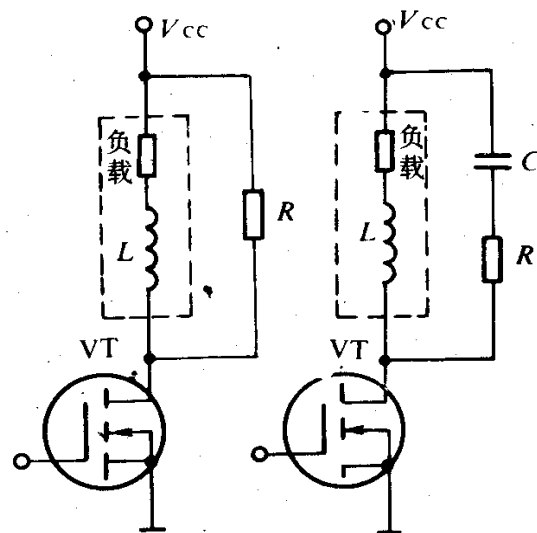
4. 防浪涌应用 断开感性负载时产生的浪涌电压



- 开关电源，功率管驱动变压器或继电器负载
- 输出从低电平向高电平瞬时转换时出现
- 电感越大，浪涌电压越高
- 易引起器件击穿

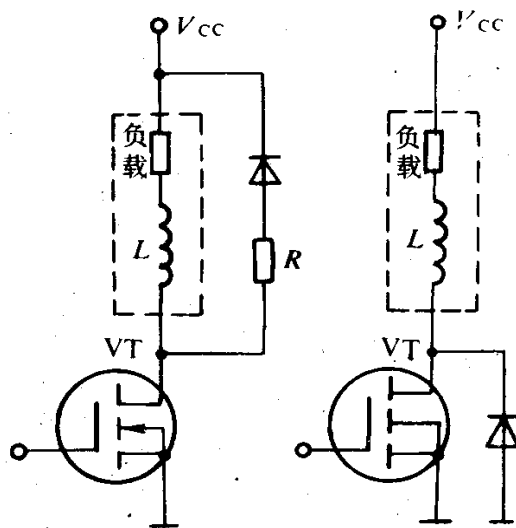
电感负载产生浪涌的抑制方法

- 并接电阻：但增加功耗
- 并接RC支路：易产生共振
- 并接二极管：可能影响电路速度
- 齐纳二极管：钳位电压应适当



(a)

(b)

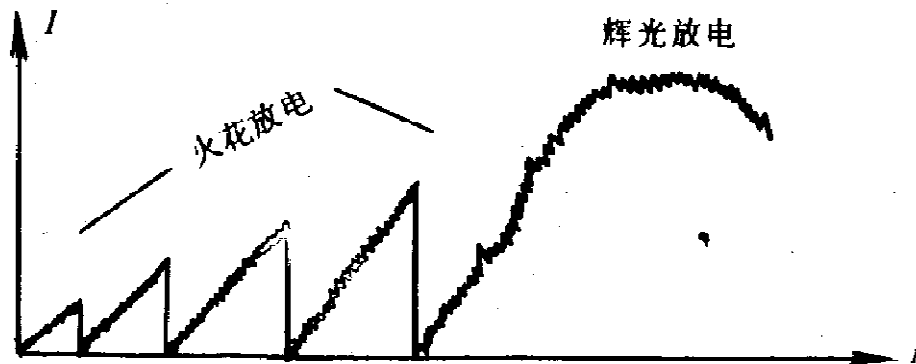


(c)

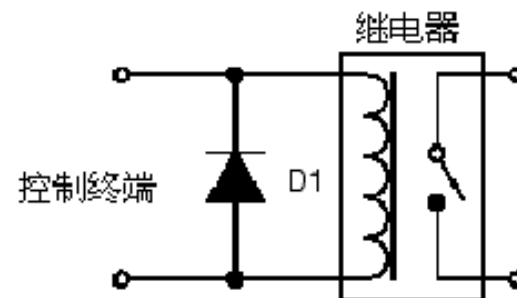
(d)

4. 防浪涌应用

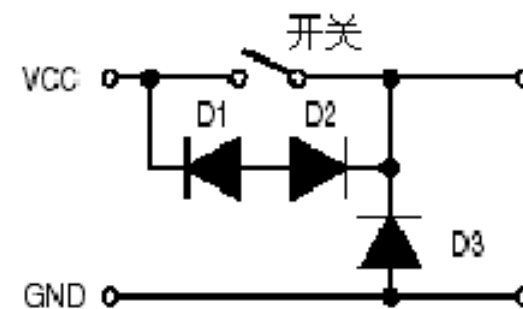
继电器产生的:



- 继电器线圈电感产生的浪涌电压
- 继电器触点放电产生的浪涌电流



- 继电器线圈浪涌抑制



- 继电器触点浪涌抑制

4. 防浪涌应用的浪涌

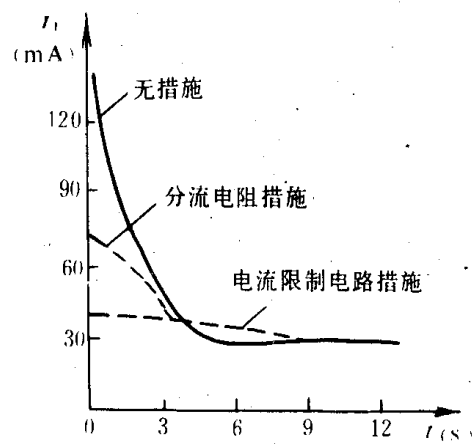
白炽灯产

■ 来源

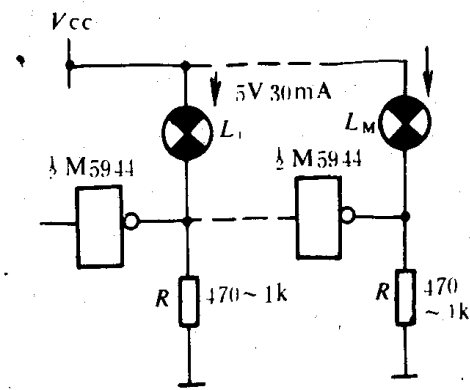
- 冷电阻浪涌：开启瞬间
- 闪烁浪涌：失效瞬间

■ 对策

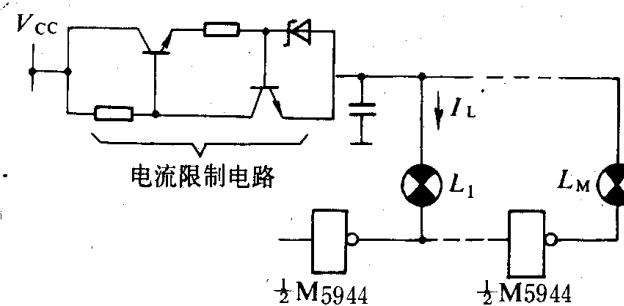
- 采用分流电阻
- 采用限流电路



(a)



(b)



(c)

4. 防浪涌应用

交流电网产生的浪涌

雷电

- 直接雷击：1000kV
- 雷电感应：线间6kV，对地12kV

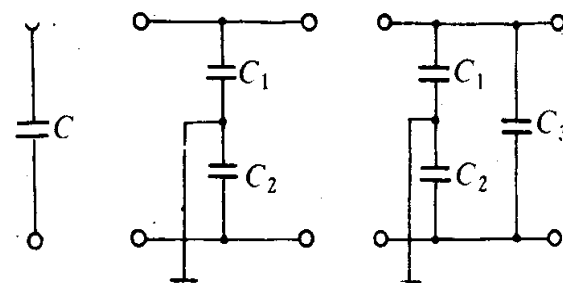
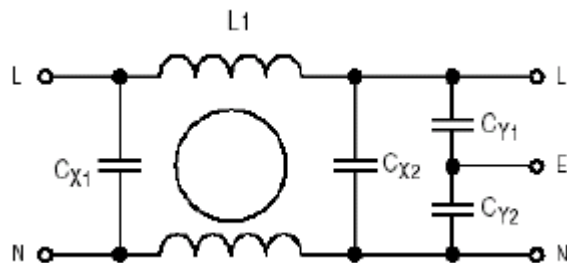
■ 开关

- 大型电气设备的通断：常规电压的3~4倍
- 三相电未同时投入：常规电压的2~3.5倍

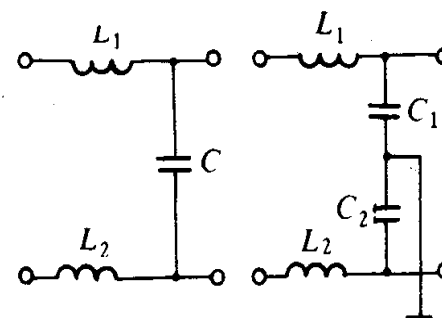
■ 接地

- 对地短路时：常规电压的2倍
- 接地开路时：常规电压的4~5倍

交流电源
滤波器

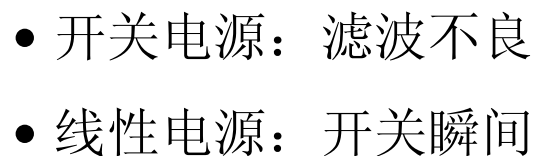


(a) (b) (c)



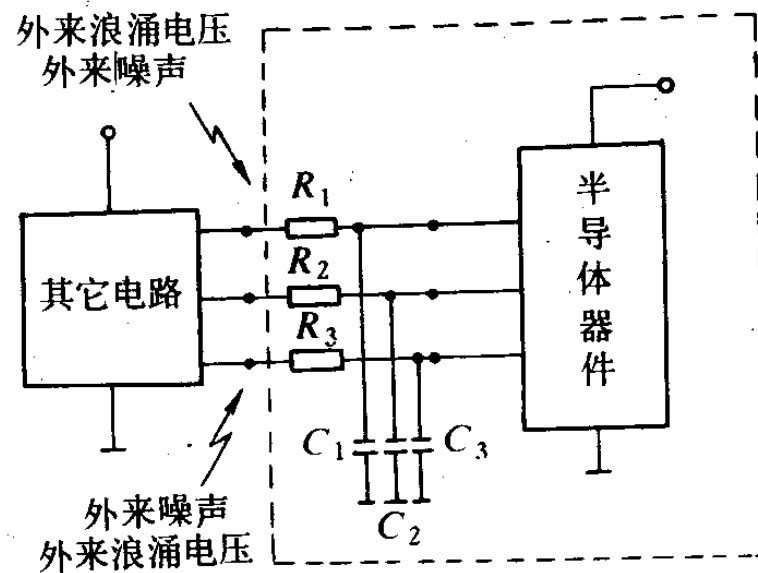
(d) (e)

设备供电电源产生的浪涌



The diagram illustrates a connection between a switch power source (开关电源) and a load circuit (负载电路). The power source has two terminals, labeled '+' and '-'. The load circuit also has two terminals, labeled '+' and '-'. A double-twisted wire (双绞线) is used to connect the two circuits. The wire consists of two twisted pairs. One pair connects the '+' terminal of the power source to the '+' terminal of the load circuit. The other pair connects the '-' terminal of the power source to the '-' terminal of the load circuit. An upward arrow points from the twisted wire to a detailed cross-sectional view of the wire above it, which shows multiple twisted pairs of conductors within a protective sheath.

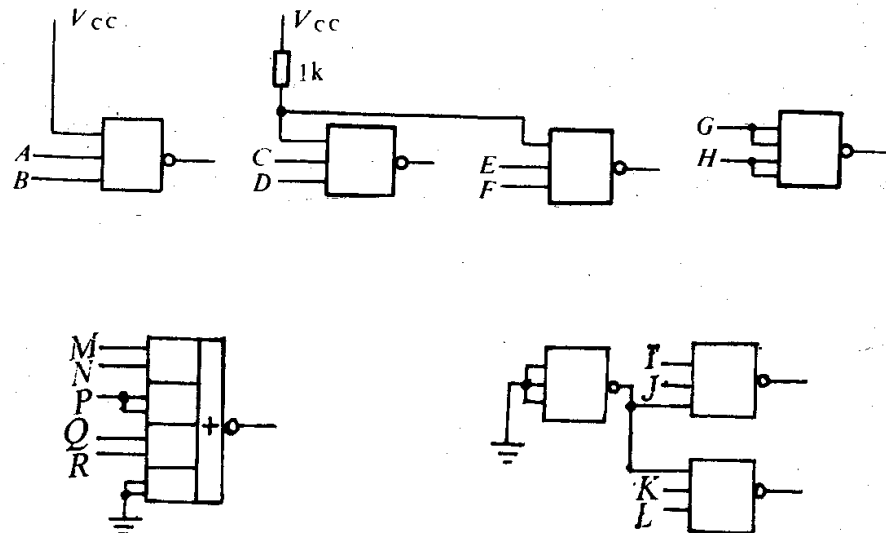
(b)



4. 防浪涌应用

TTL电路防浪涌应用

- 具有图腾柱或达林顿输出结构的TTL电路不宜并联使用
- 电源端与地端不能错接，输出端不能对电源或地端短路
- 未使用的输入端不宜悬空，更不能接开路长线
- 闲置不用的门电路应处于截止状态，以节省整机功耗
- 输入信号的脉冲宽度必须长于传播延迟时间，上升沿或下降沿尽量陡（逻辑电路 $<1\mu\text{s}$ ，时钟电路 $<150\mu\text{s}$ ）
- 长线输入接 $500\Omega \sim 1\text{k}\Omega$ 上拉电阻，驱动长线接 $<51\Omega$ 串联电阻

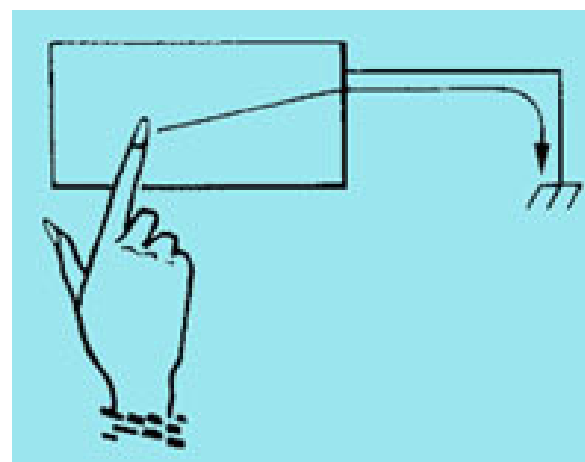
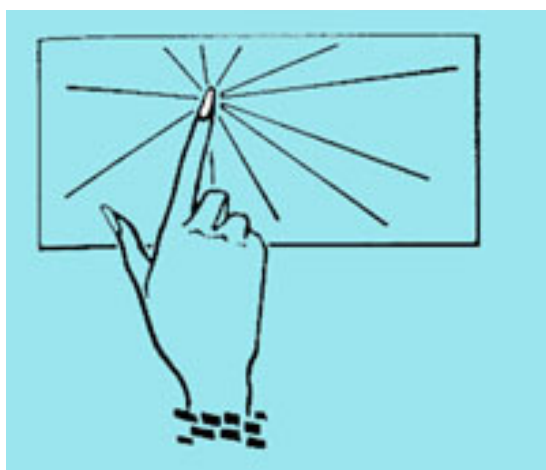


5. 防静电应用

模型

人行走-键

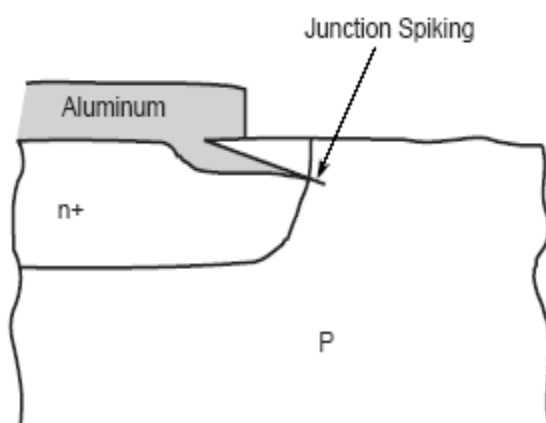
- 人在地毯上行走：鞋与地毯摩擦产生静电(假定为正电荷)
- 人体电荷重新分布：脚带正电荷，手带负电荷
- 人手接近(或触摸)键盘：键盘通过感应(或传导)带正电荷(或负电荷)，接近速度越快，距离越近，电荷越多
- 键盘对地放电或辉光放电：键盘上的元器件损坏



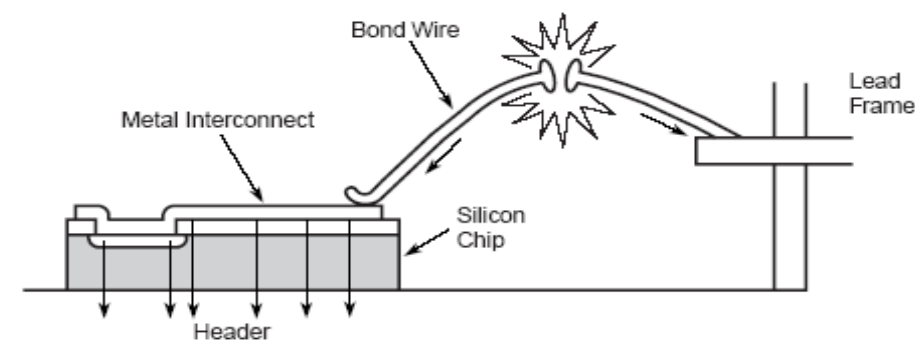
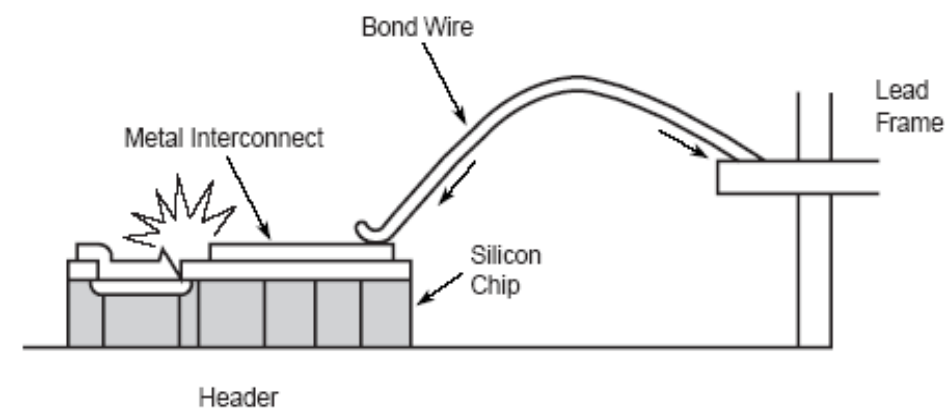
5. 防静电应用

静电失效

- 突发失效 (catastrophic damage): 单次高电压, 功能即时丧失
- 隐性失效 (latent damage): 多次低电压, 寿命缩短, 抗应力能力下降)



pn结击穿 ↑
金属化失效 ↗
键合线开路 →



5. 防静电应用

机理

■ 静电放电形式

- 向器件放电
- 来自器件的放电
- 场致放电

■ 静电失效机理

■ 过电压场致失效

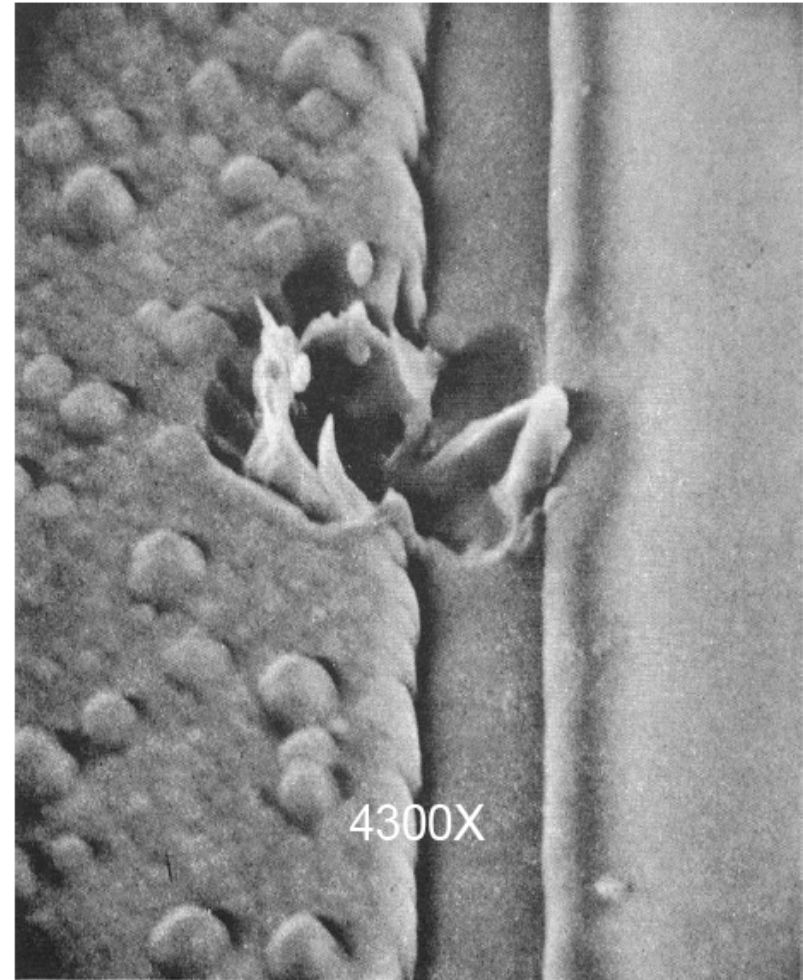
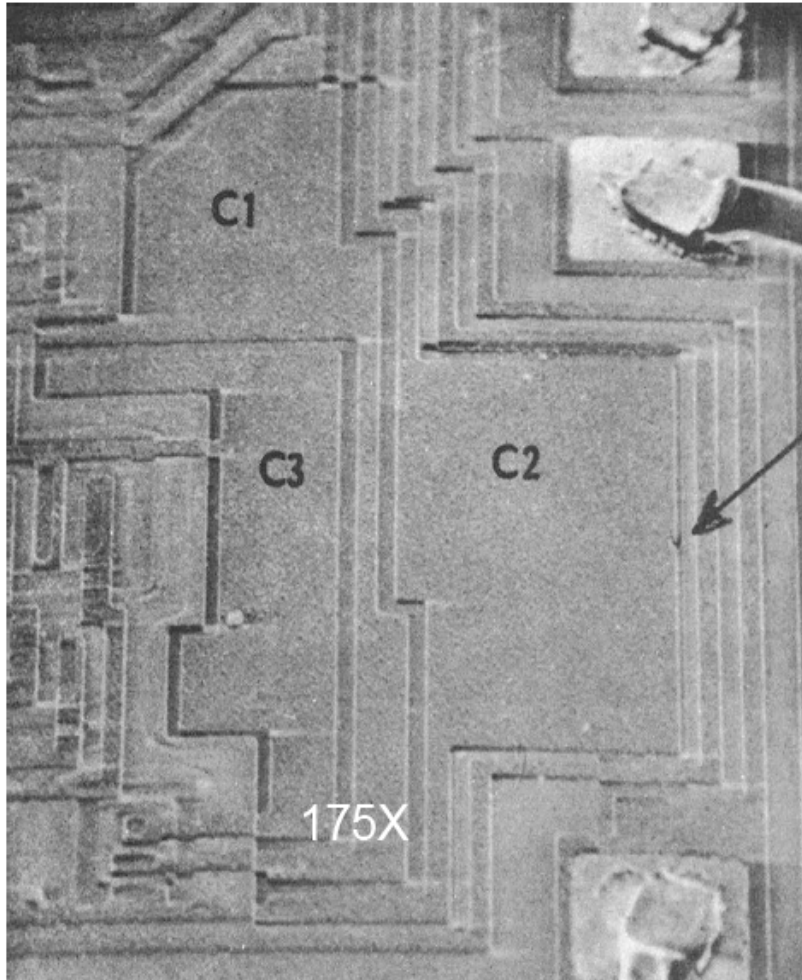
- 现象：MOS器件栅击穿，双极器件pn结击穿
- 因素：输入电阻越高，输入电容越小，越容易失效

■ 过电流热致失效

- 现象：直接烧毁，诱发闩锁效应或二次击穿效应
- 因素：电流截面越小，对地电阻越低，环境温度越高，越容易失效

5. 防静电应用

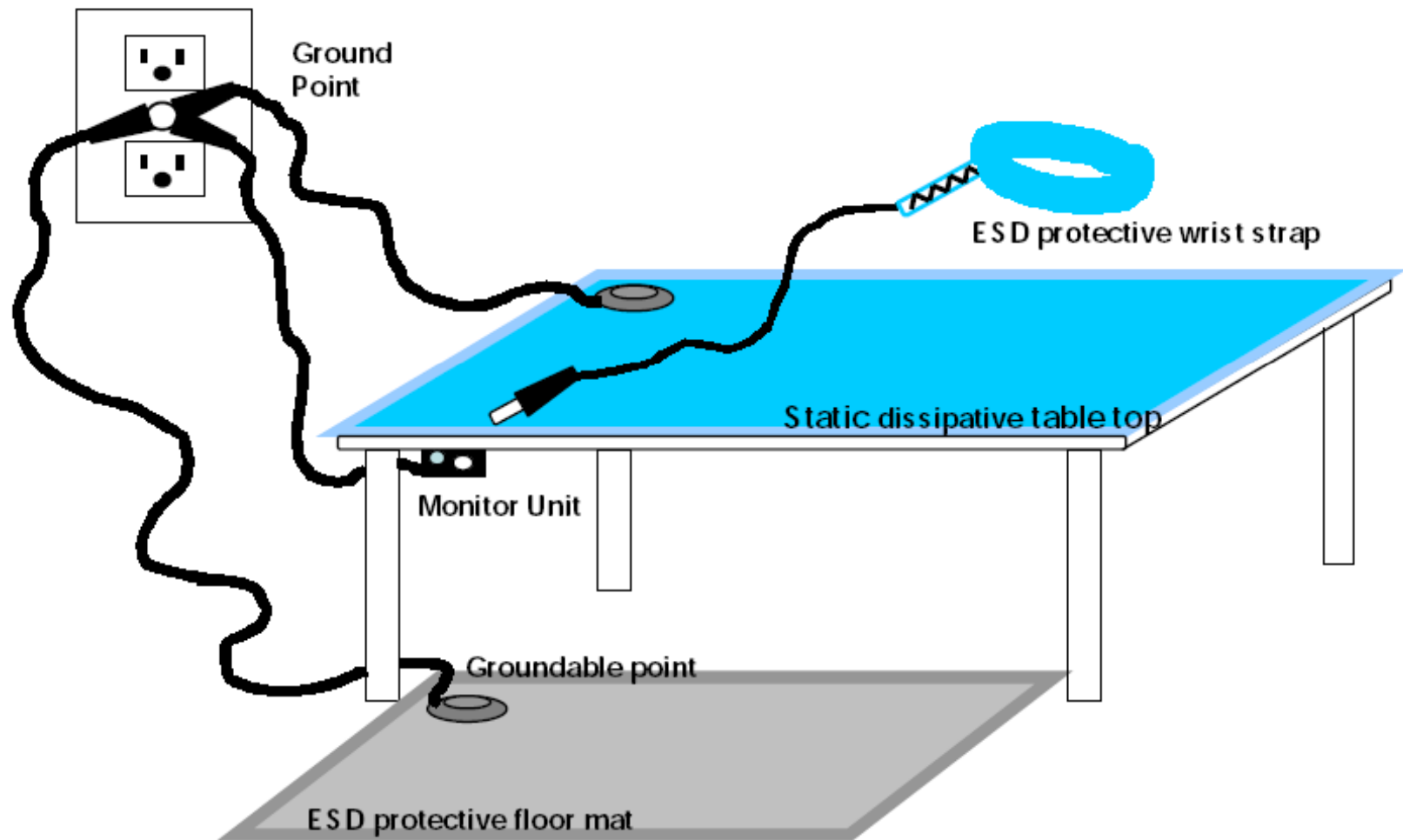
实例: 静电对MOS电容的破坏



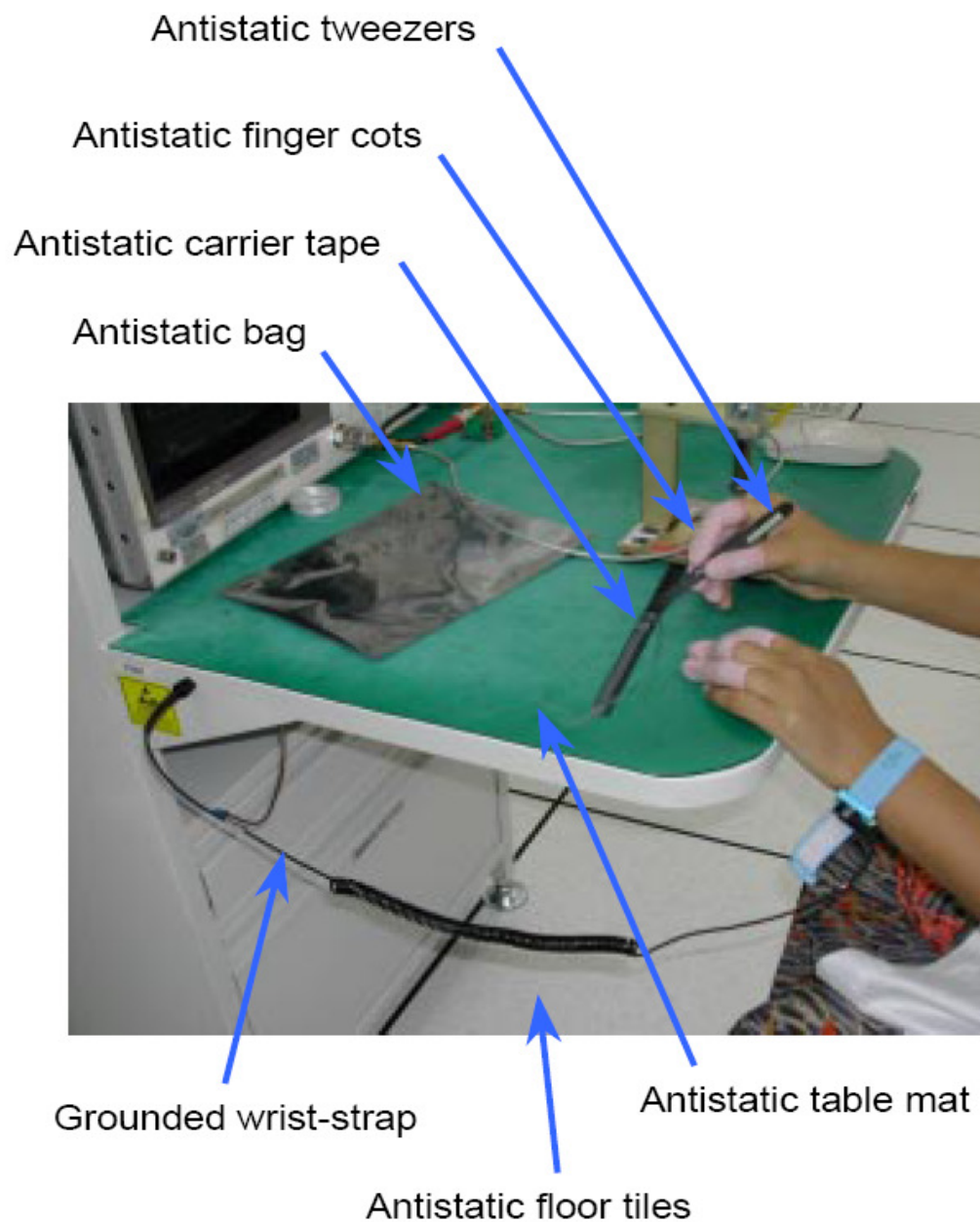
5. 防静电应用

防静电工

台



5. 防静电应用





5. 防静电应用

相对湿度对静电电压的影响

	RH 10~20%	RH 65~90%
在地毯上走动	35, 000V	1500V
在塑料地板上走动	12, 000V	250V
塑料文件袋	7, 000V	600V
坐在椅子上的工人	6, 000V	100V

5. 防静电应用

制

环境控制与接地

■环境控制

- 湿度：抗静电要求湿度不能过低，但抗腐蚀要求湿度不能过高，最佳值在40~60%
- 离子风：中和表面静电电荷
- 防静电涂剂：促进静电耗散，减少摩擦生电

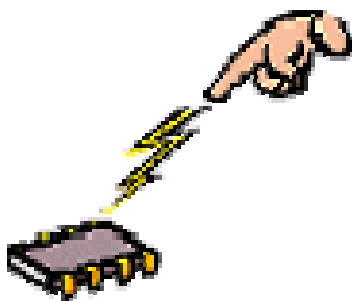
■接地控制

- 接地回路应有足够的载流量
- 操作人员、导电物体接地必须接有适当阻值的电阻（100k），以保安全
- 不能与避雷地、交流地共用
- 视情况可以与电气保护地、电磁屏蔽地等共用

5. 防静电

操作控制

- 插拔：禁止带电插拔，插上器件或印刷板后才通电，断电后才拔出器件或印刷板
- 安装：只接触器件外壳不接触引脚，接触器件前先放电，焊接与装配器具接地
- 调试：禁止不带电加信号，不要将电源加到非电源端，不要插错腿，不使用的输入端最好接地
- 动作：尽可能减少动作的频度和速度



5. 防静电应用

运送要求

■ 包装要求

- 防止静电的产生和积累
- 使器件的所有管脚短路
- 对外电场有屏蔽作用

■ 运送要求

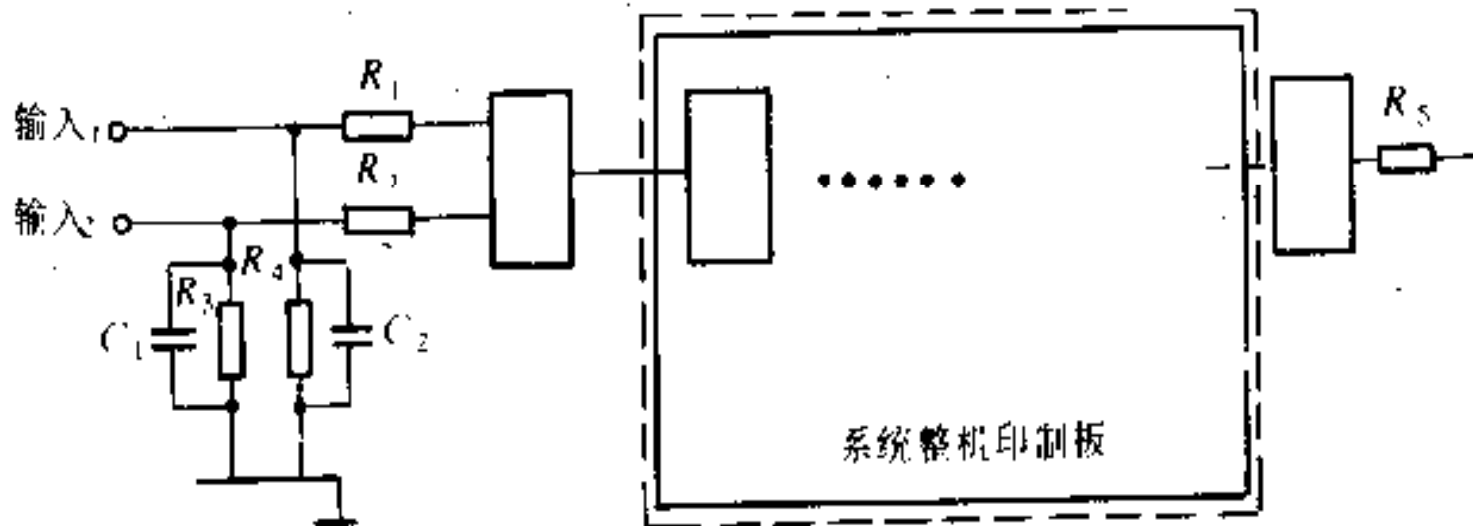
- 器件间隔离传送
- 管脚短路传送
- 尽量减少机械振动和冲击
- 与传送载体无摩擦



5. 防静电应用 法(1)

板级静电防护

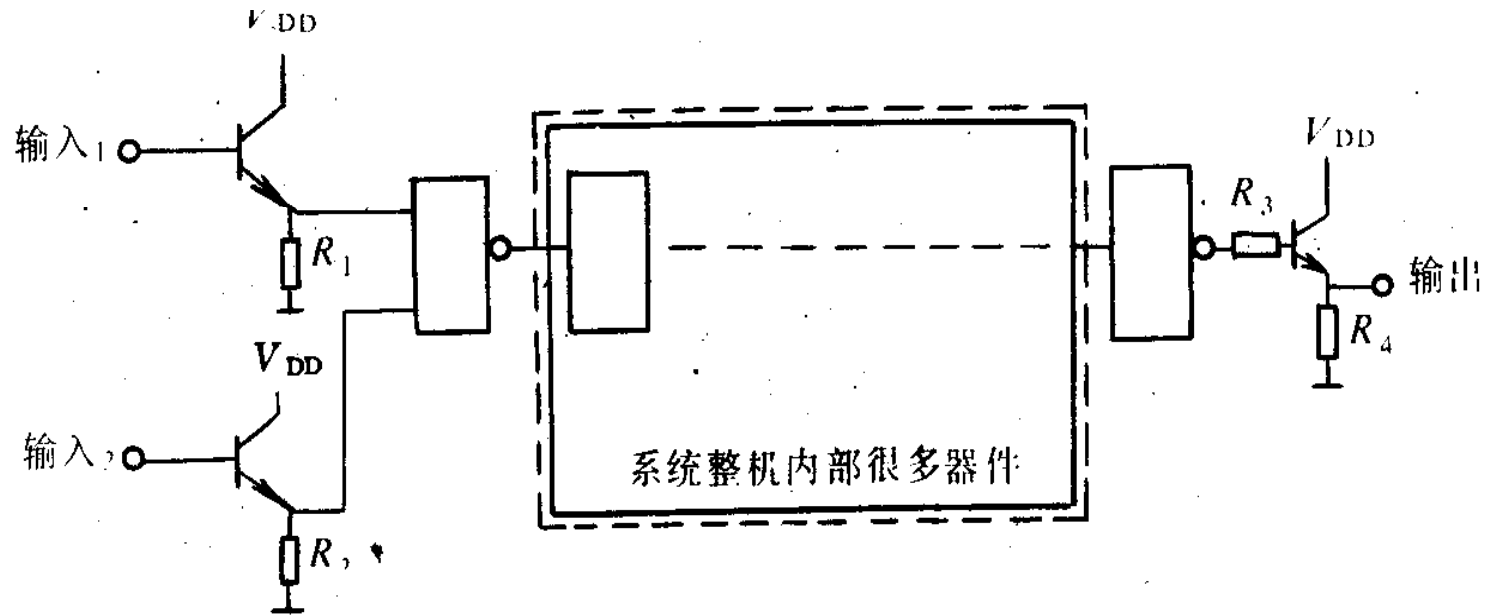
采用限流和泄放电阻（对输入阻抗有影响）



5. 防静电应用 (2)

板级静电防护方

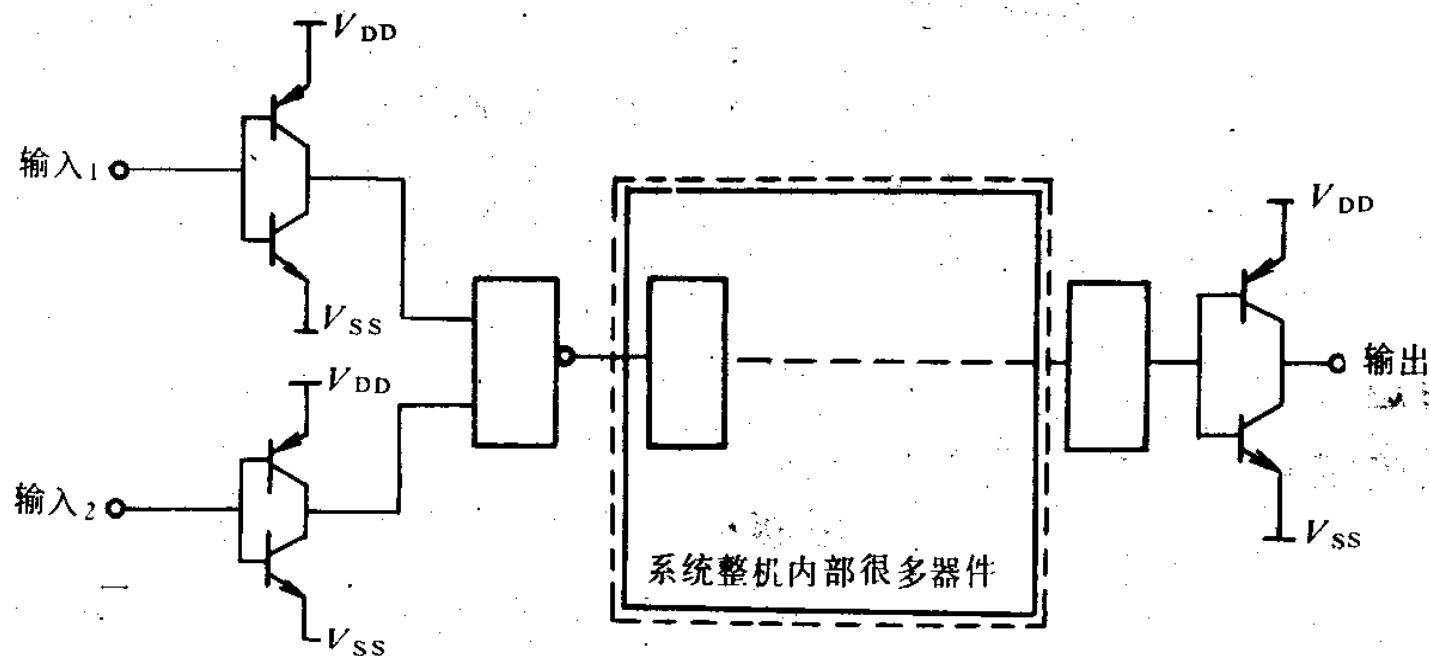
采用射级跟随器（对速度有影响）



5. 防静电应用 法(3)

板级静电防护

采用互补放大器（失真度小）

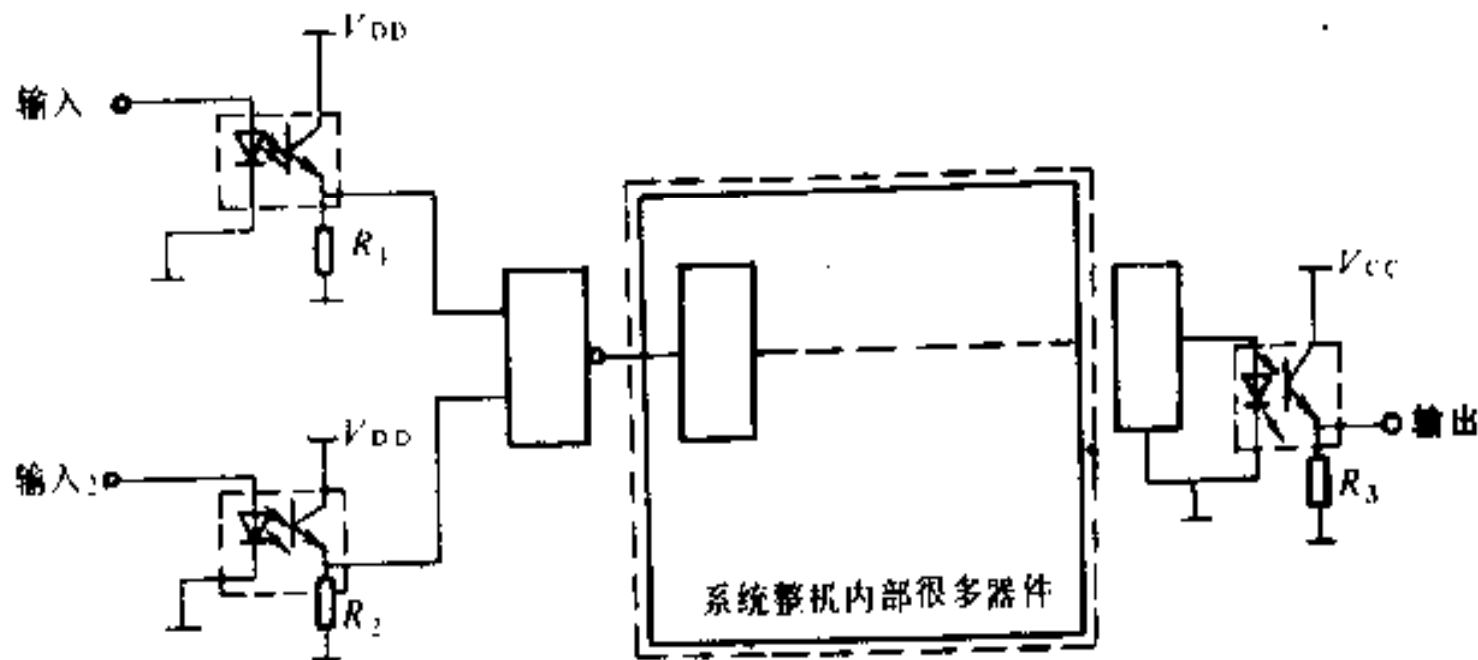


5. 防静电应用

(4)

板级静电防护方

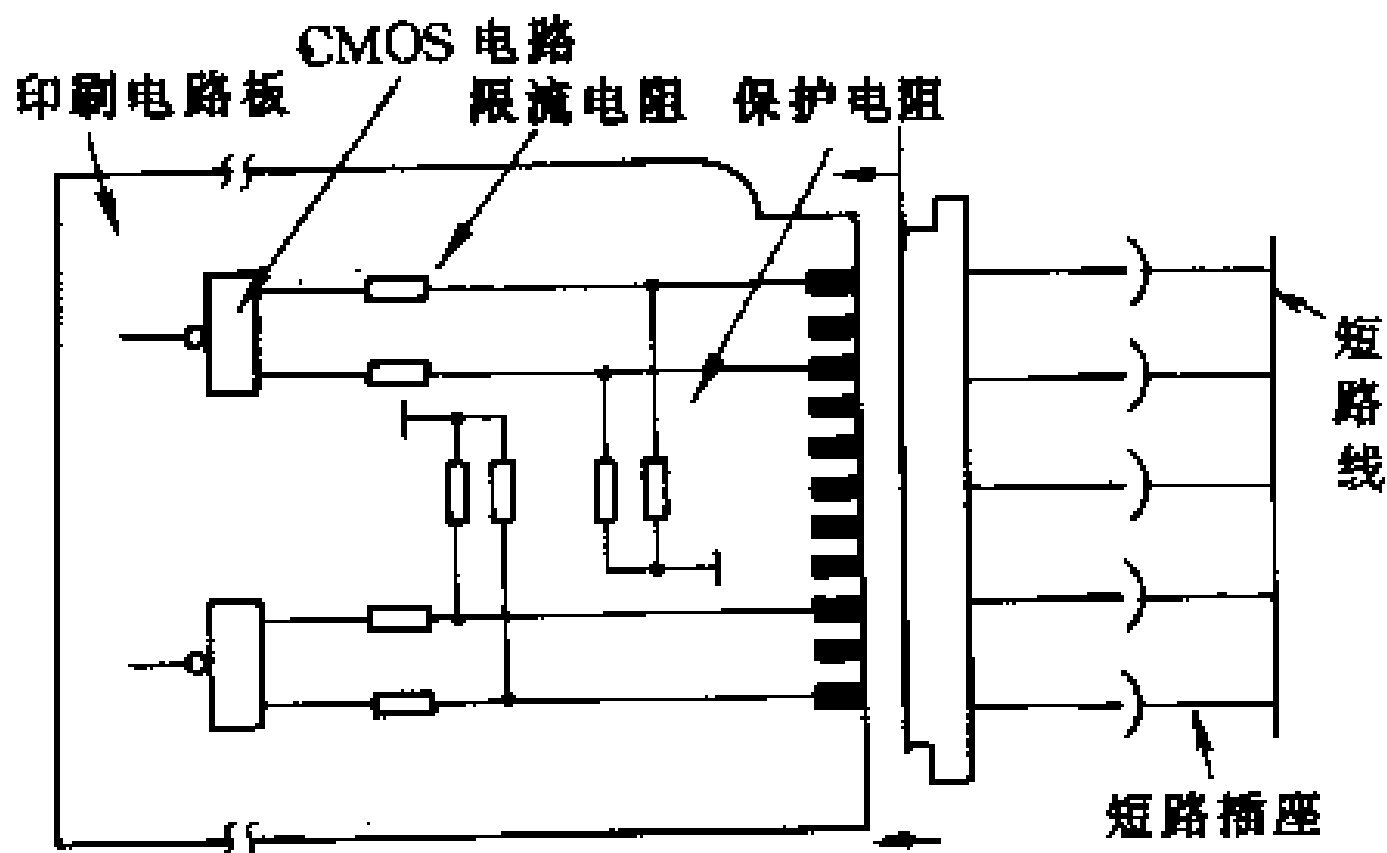
采用光电耦合器（隔离地线干扰）



5. 防静电应用 (5)

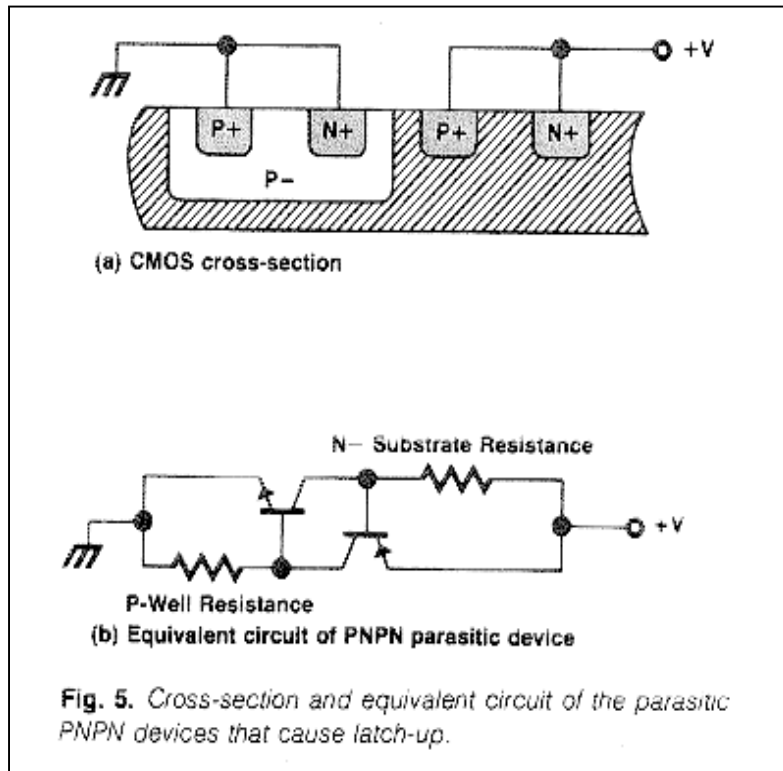
板级静电防护方法

插拔保护

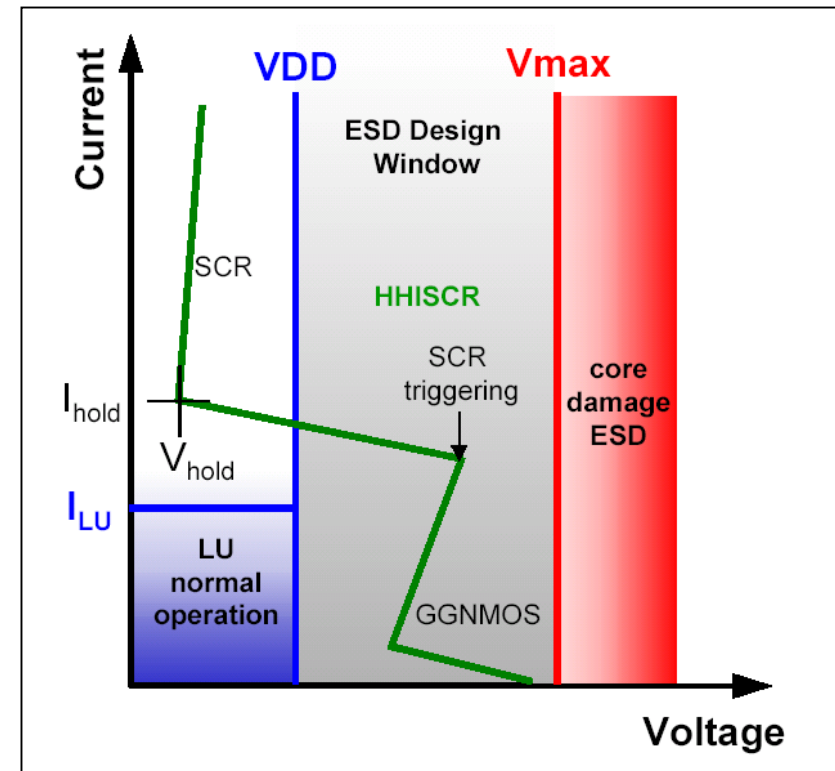


6. 防闩锁应用

CMOS器件的闩锁效应



CMOS器件中的寄生PNPN管



闩锁发生时的电流-电压曲线

6. 防闩锁应用

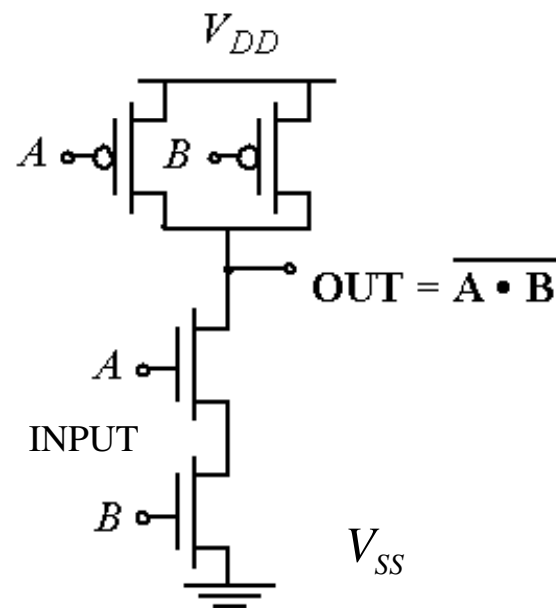
诱发闩锁的外部因素

■ 外部诱因

- 输入或输出端的电平下降到比 V_{SS} 还低，或者上升到比 V_{DD} 还高
- 无论是瞬时值还是稳态值
- 干扰可以来自输入、输出和电源端

■ 影响因素

- 输入端 > 输出端
- 传输门 > 逻辑门
- 多输入 > 单输入
- 扩散电阻保护 > 多晶硅电阻保护

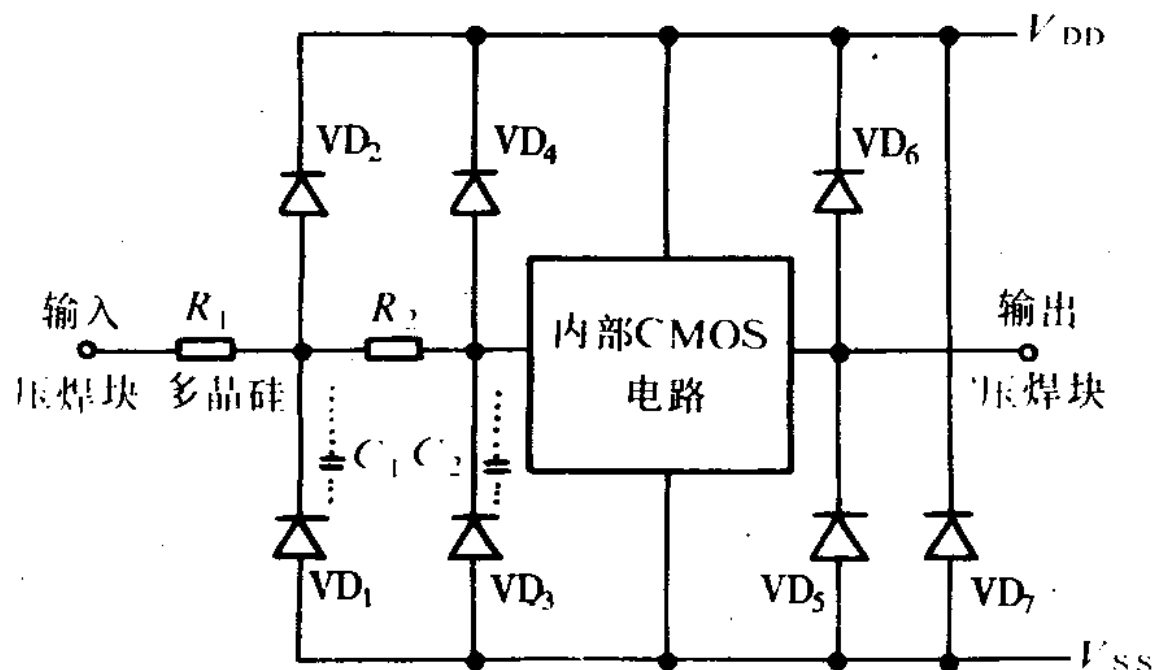


6. 防门锁应用

限压

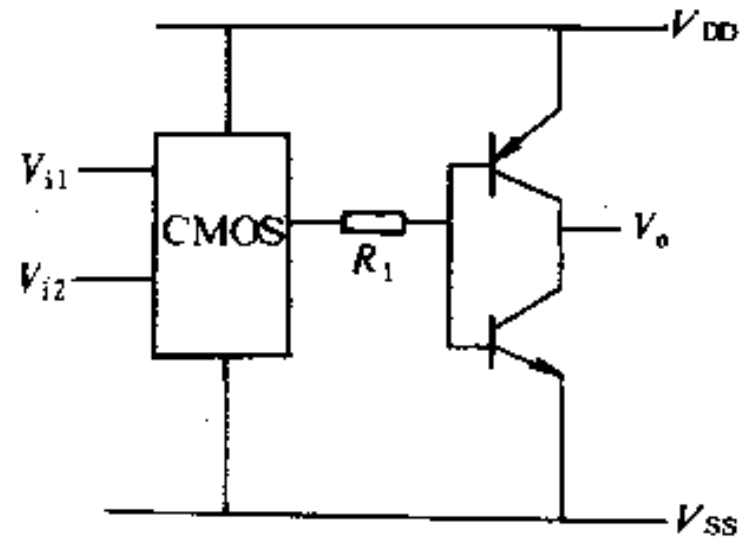
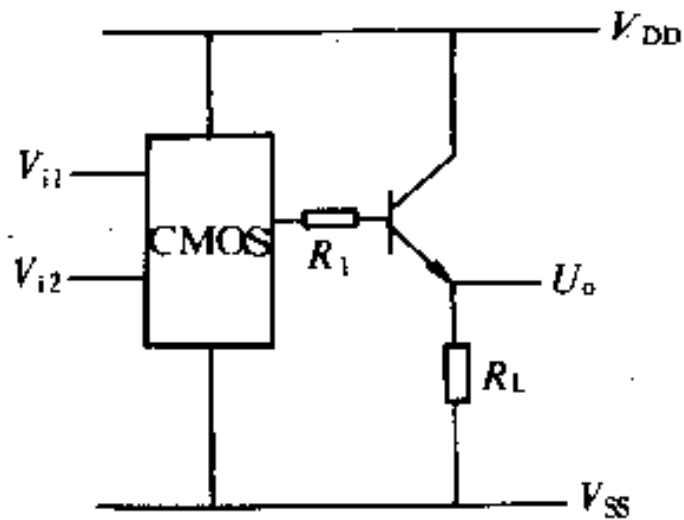
限流

- 采用保护二极管和限流电阻
 - 阻值200~2k, 限制电流<10mA(输入端与输出端)



6. 防闩锁应用 出隔离

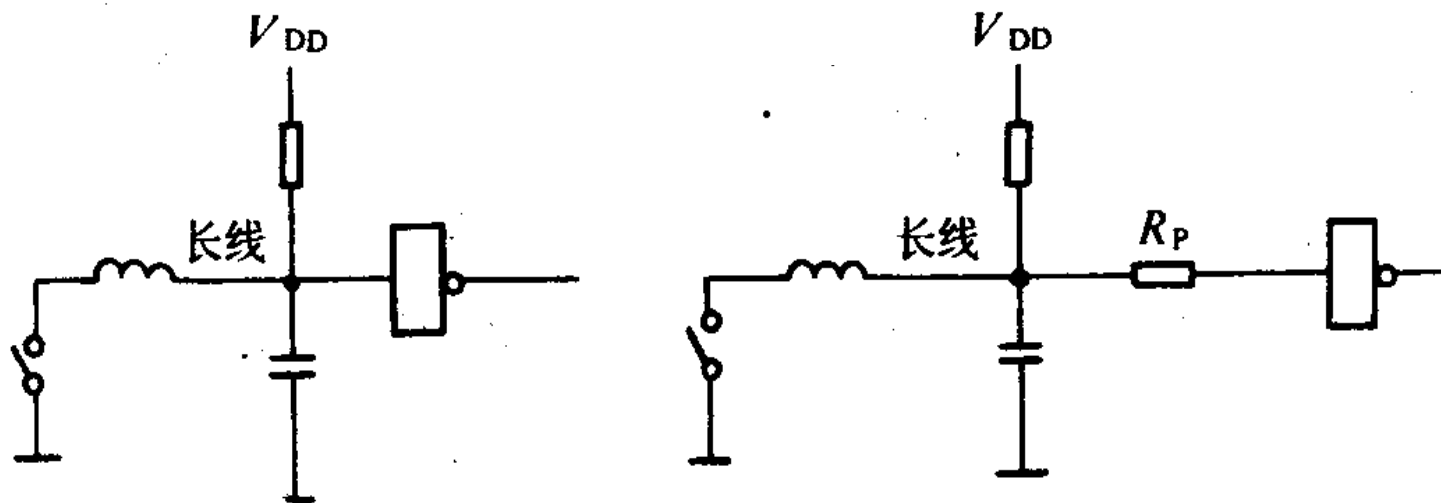
- 输出端采用隔离放大器



6. 防闩锁应用

避免长输入线

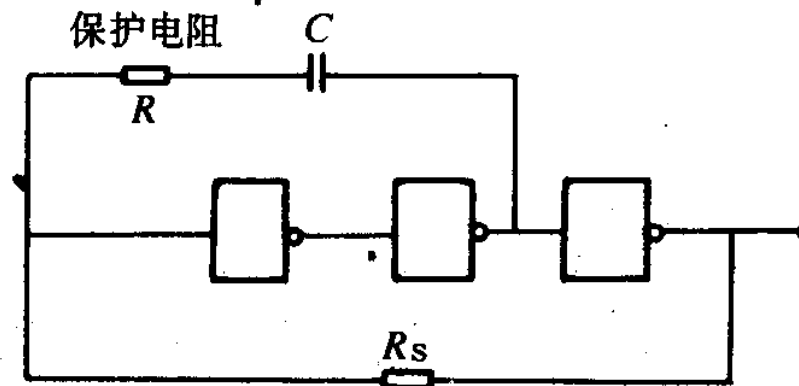
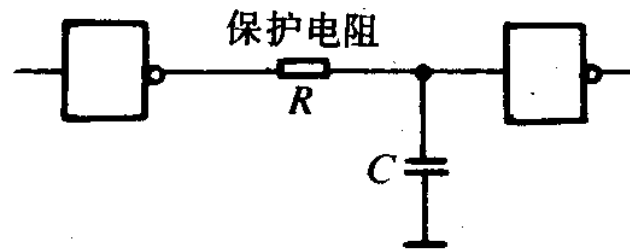
- 输入端避免使用长导线或电感 ($R_p = V_{DD}/1\text{mA}$)，必须使用长线时应加线驱动器或缓冲器



6. 防闩锁应用

避免大电容负

- 避免大电容负载
($<500\text{pF}$)

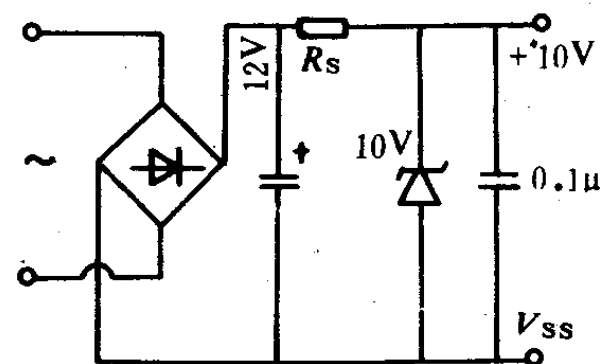
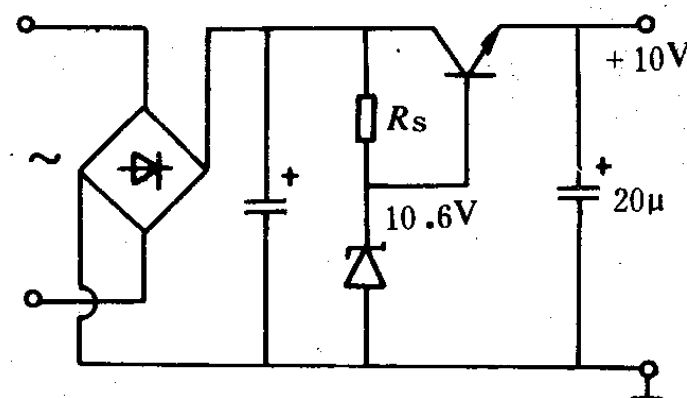


6. 防闪烁应用

容量

限制电

- 电源的电流容量不宜过大

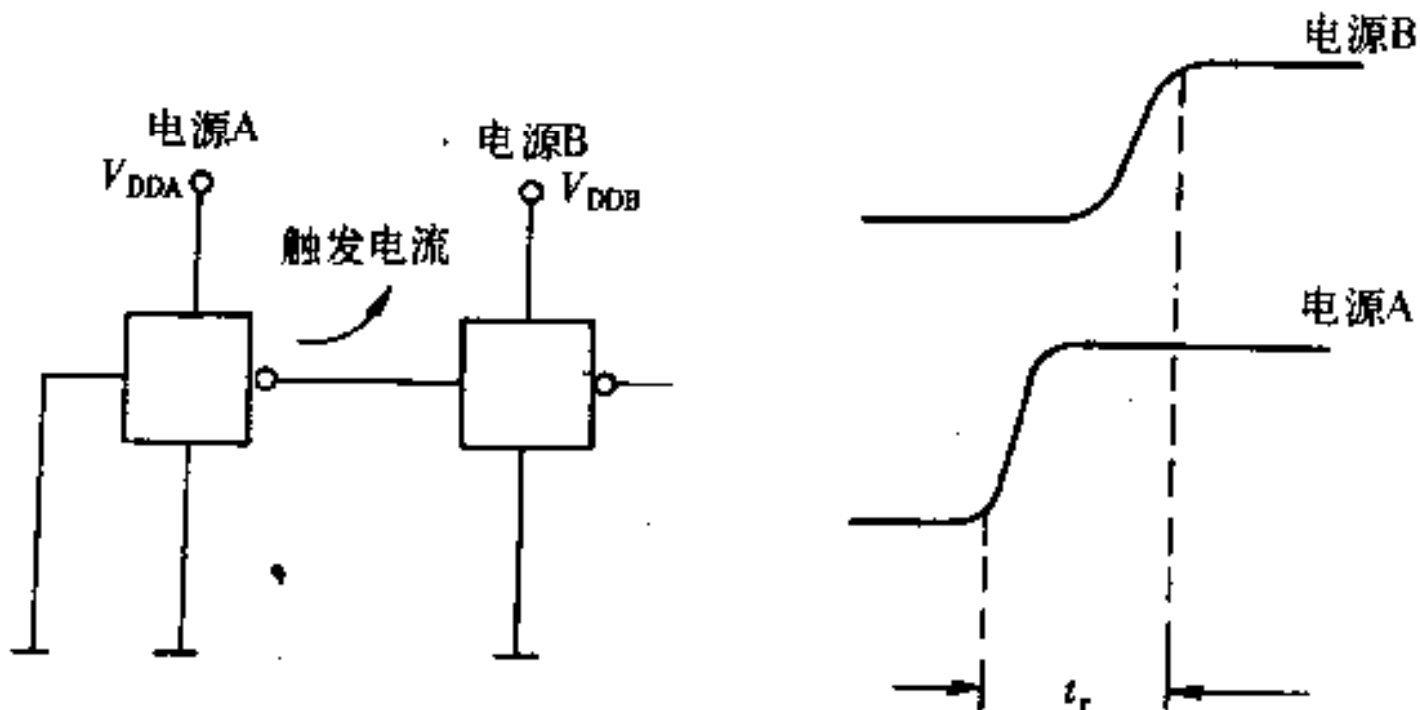


6. 防闕锁应用

电源

避免双

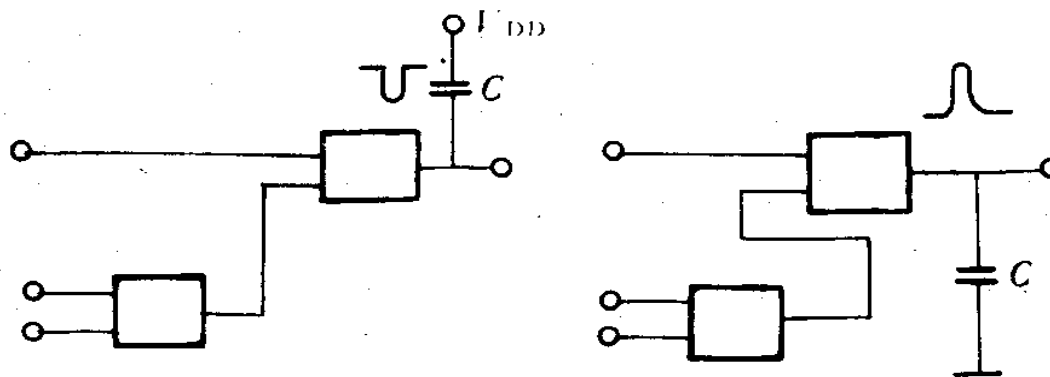
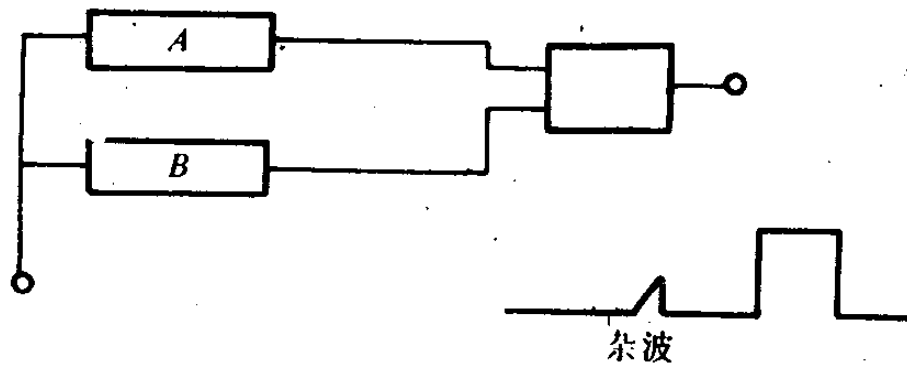
- 同一设备中的**CMOS**电路应避免使用两种不同电压的电源，或者电源电压一样，但建立时间不一样

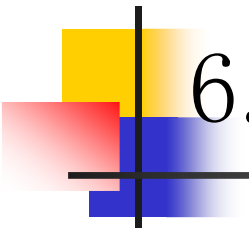


6. 防闪烁应用

避免输入延迟不同

- 尽量避免输入端同时接入多个延迟时间不同的电路





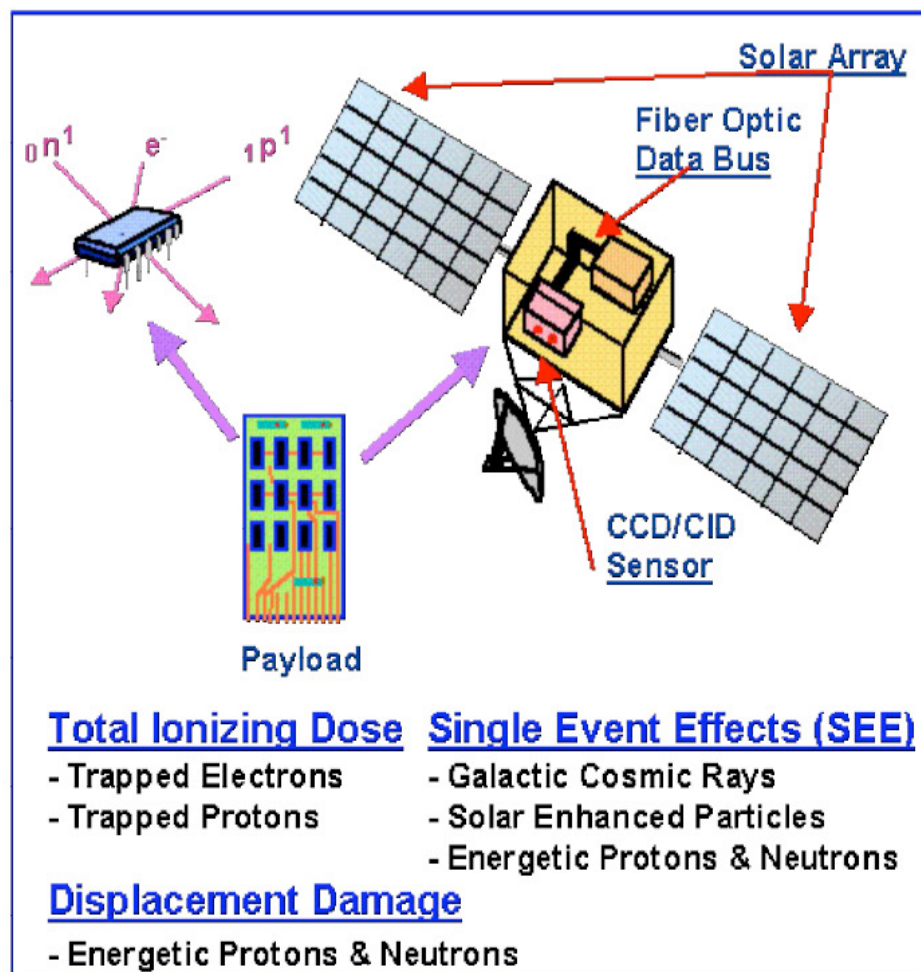
6. 防开锁应用

其它注意事项

- 开机次序：交流开关，直流开关，信号源开关
关机次序：信号源开关，直流开关，交流开关
- 多余输入端不允许悬空：在不影响电路功能的前提下，可接高电平、低电平或其他输入端
- 信号电压限制：输入电压和输出电压的幅度不能超过电源电压
- 避免端口误接：电源电压极性不能颠倒，输出端不能与电源端短路

7. 防辐射应用

辐射环境: 空间辐射

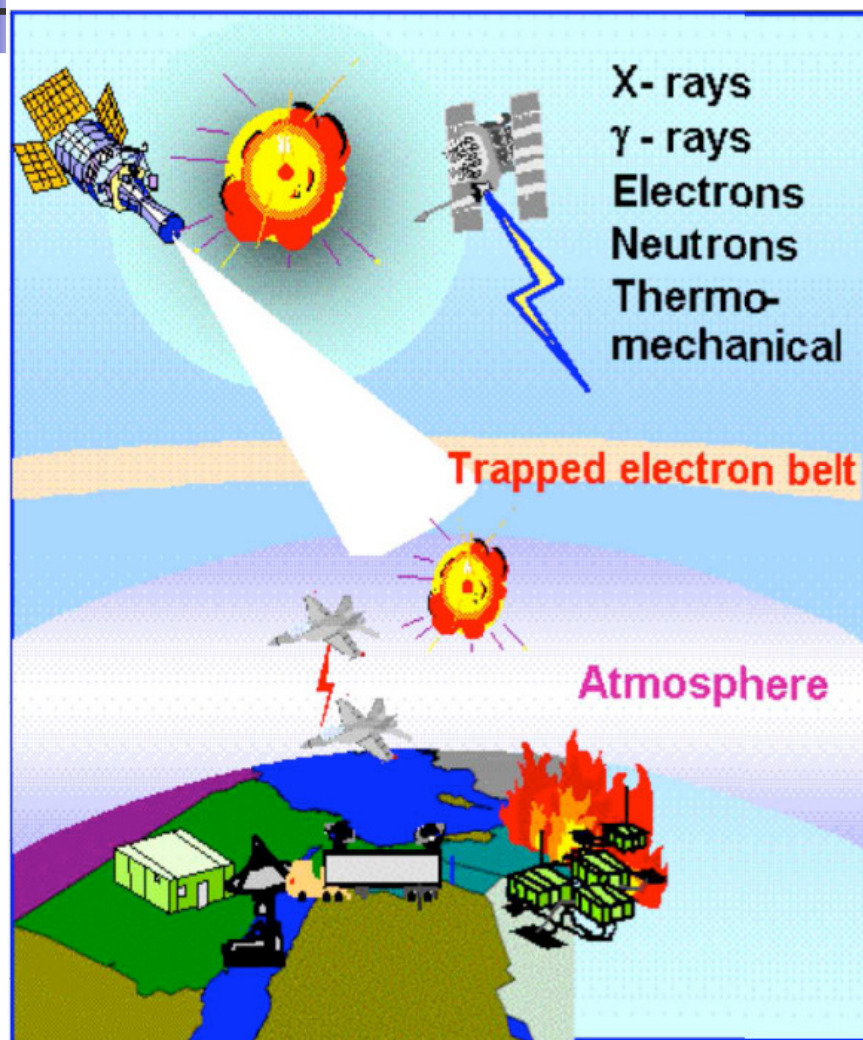


宇宙射线，来自银河系和太阳系的某些星球

- **内辐射带**：距地面 600~6000km，高能质子（~100MeV，影响中低轨道卫星）
- **外辐射带**：距地心2万 km，高能电子（20keV~1.6MeV），影响高轨道卫星
- **累计效应为主**：总剂量，rad(Si)

7. 防辐射应用

辐射环境:核辐射



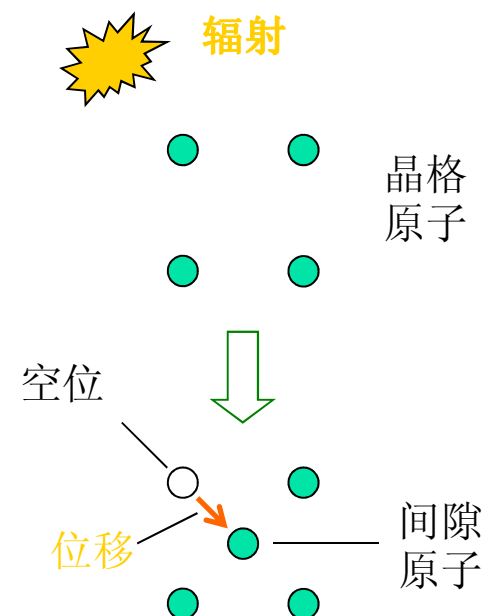
核爆炸环境和核动力环境

- **快中子流**: 能量 $>0.5\text{MeV}$, 辐射有效半径 $1\text{km}\sim$ 几十 km
- **γ 射线**: 能量 $\sim 1\text{MeV}$, 辐射有效半径 $3\text{km}\sim$ 几百 km
- **热电磁脉冲**: 电场 10^5V/m , 磁场 10^2A/m , $f=10\text{kHz}\sim 100\text{MHz}$, 脉冲间隔 $10\sim 30\text{ns}$
- **瞬态效应为主**: 剂量率, $\text{rad}(\text{Si})/\text{s}$

7. 防辐射应用

辐射物理效应:位移

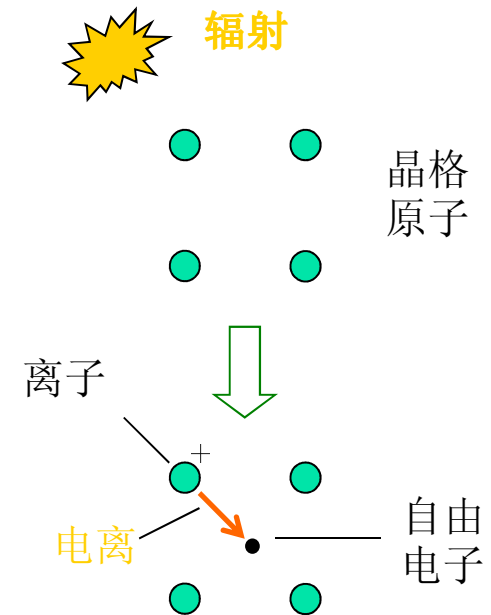
- 辐射使晶格原子位移→空位、间隙原子
- 中子辐射显著：不带电，能量大，穿透能力强
- 引入辐射诱生能级
 - 复合中心→少子寿命↓
 - 杂质补偿中心→多子浓度↓ →电阻率↑
 - 散射中心→载流子迁移率↓
- 永久性损伤：不可恢复

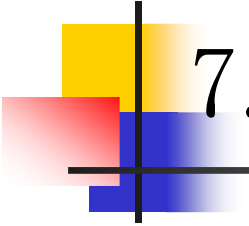


7. 防辐射应用

辐射物理效应: 电离

- 辐射使晶格原子电离→自由电子、带电离子
- γ 射线显著: 光电效应
- 引入表面缺陷
 - 氧化层正电荷
 - Si-SiO₂界面陷阱
 - 氧化层表面可动离子
- 半永久性损伤和瞬时损伤





7. 防辐射应用

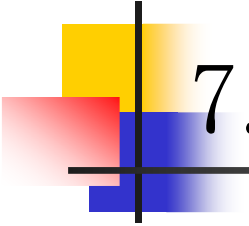
辐射诱发失效

■ 双极器件(对中子辐射敏感)

- 二极管：正向动态电阻 $\uparrow$ ，反向击穿电压 $\uparrow$ ，漏电流 $\uparrow$
- 放大管：电流放大系数 $\downarrow$ ，饱和压降 $\uparrow$
- 开关管：上升时间 $\uparrow$ ，存储时间和下降时间 $\downarrow$ ，低电平阈值 $\uparrow$

■ MOS器件(对电离辐射敏感)

- 阈值电压漂移
- 跨导退化
- 隔离结漏电流
- 单粒子引起误触发



7. 防辐射应用

元器件的选用:比较

■ 不同类型元器件

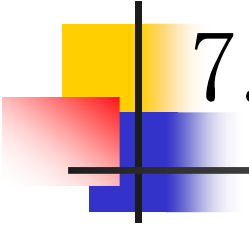
- 无源元件>有源器件
- 二极管>三极管
- JFET>BT>MOSFET
- 分立线路>集成电路（对于电离辐射）
- 数字集成电路>模拟集成电路
- 高频、高速运用>低频、低速运用
- 大电流运用>中小电流运用
- 高电源电压运用>低电源电压运用

7. 防辐射应用

元器件的选用: IC

集成电路

- 双极电路抗中子辐照能力差，最敏感的参数是电流放大系数 h_{FE} ；
MOS电路抗电离辐照的能力差，最敏感的参数是阈值电压 V_T
- 数字集成电路>模拟集成电路
- 介质隔离电路>pn结隔离电路
- 绝缘衬底（CMOS/SOI）电路>硅衬底电路（CMOS/Si）
- GaAs电路>Si电路
- 抗中子辐照：CMOS/SOI>CMOS/Si>肖特基TTL> I^2L >双极型线性电路
- 抗稳态电离辐照：ECL>肖特基TTL> I^2L >CMOS>NMOS
- 抗瞬态电离辐照：CMOS/SOI>CMOS/Si、 I^2L >NMOS、ECL、肖特基TTL



7. 防辐射应用

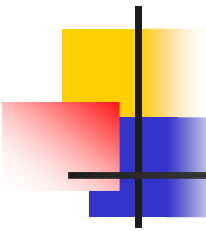
元器件的选用:分立元器件

■ 双极晶体管

- 大功率管>小功率管
- 高频管>低频管
- 开关管>放大管
- 锗管>硅管
- NPN管>PNP管

■ 分立元器件

- 无源元件>有源器件
- 闸流管、单结晶体管和太阳能电池的抗辐射能力最差
- 隧道二极管>电压调整与基准二极管>整流二极管



7. 防辐射应用

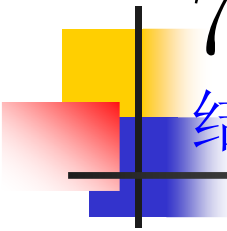
电路设计

■ 容差设计

- 减少电路对器件辐射敏感参数的依赖性
- 器件辐射敏感参数的允许偏差尽可能地大
- 按最坏情况设计

■ 保护电路设计

- 光电流补偿
- 负反馈
- 电压箝位、限流
- 温度补偿
- 饱和逻辑、寄生消除



7. 防辐射应用

结构设计

■ 采取严格的屏蔽措施

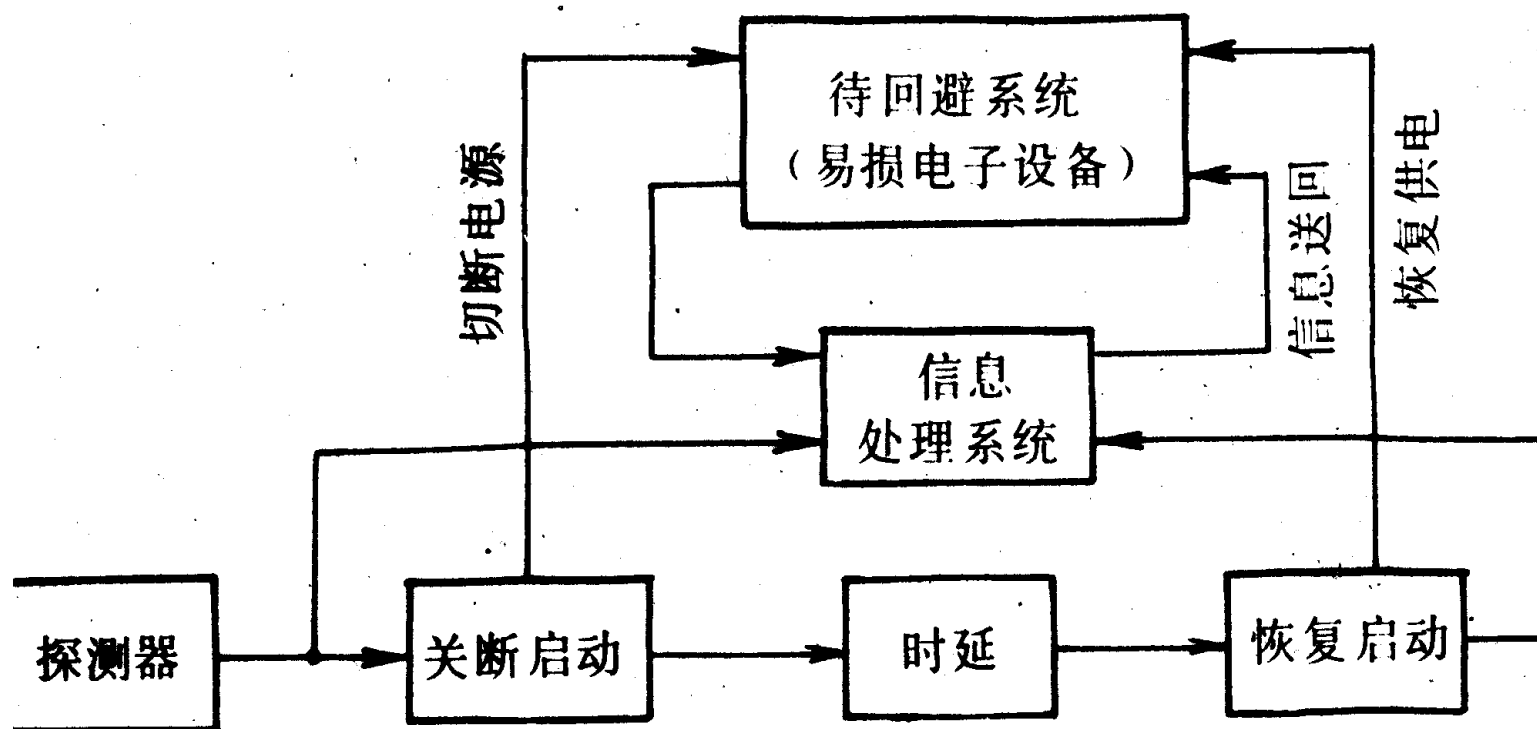
- 器件外壳、设备机箱、系统蒙皮
- 金属壳越厚，屏蔽效果越好

■ 布局安排

- 抗辐射能力差的器件尽量放在设备的中心部位
- 含有许多辐射敏感器件的单元应尽量靠近
- 装有辐射敏感器件的机盒应放在靠近厚重构件的位置

7. 防辐射应用 系统设计

采用“回避”技术



7. 防辐射应用

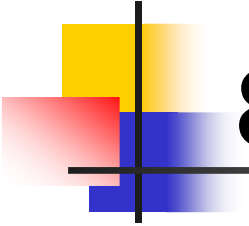
选

原理

- 同批器件抗辐射能力的离散性可达2~3个数量级
- 通过小剂量辐照，剔除参数变化大的器件

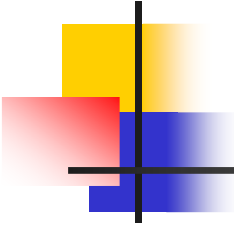
■ 要点

- 选择辐照敏感参数为测量参数：双极为 h_{FE} ，MOS为 V_T
- 选择合适的辐照源：中子辐射需要高温退火，适合圆片级预筛选； γ 射线穿透能力强，适合大功率深结器件
- 选择合适的辐照剂量：中子辐照， $5 \times 10^{12} \sim 4 \times 10^{15} / \text{cm}^2$ ， $E \geq 0.1 \text{ MeV}$ ； γ 辐照， $2 \sim 3 \times 10^7 \text{ rad (Si)}$
- 选择合适的退火温度和退火时间：成品器件， $120 \sim 180^\circ \text{C}$ ；未封装芯片， $200 \sim 400^\circ \text{C}$



8. 保护元件

- **8.1 概论**
- **8.2 瞬变电压抑制二极管**
- **8.3 压敏电阻**
- **8.4 铁氧体磁珠**
- **8.5 PTC热敏电阻**
- **8.6 NTC功率热敏电阻**
- **8.7 集成保护元件**



8.1 概论

防护元件要求与类型

■ 对防护元件的基本要求

- 引入损耗尽量低
- 时间响应尽量快
- 吸收能量（过流、耐压、承受功率）尽量大

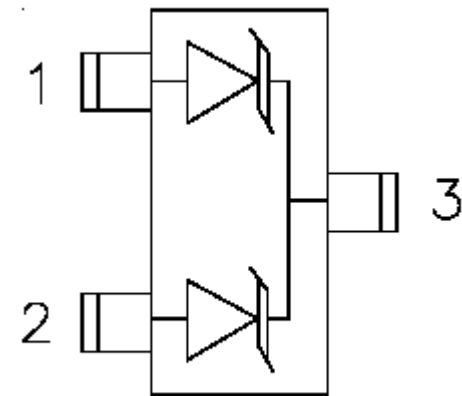
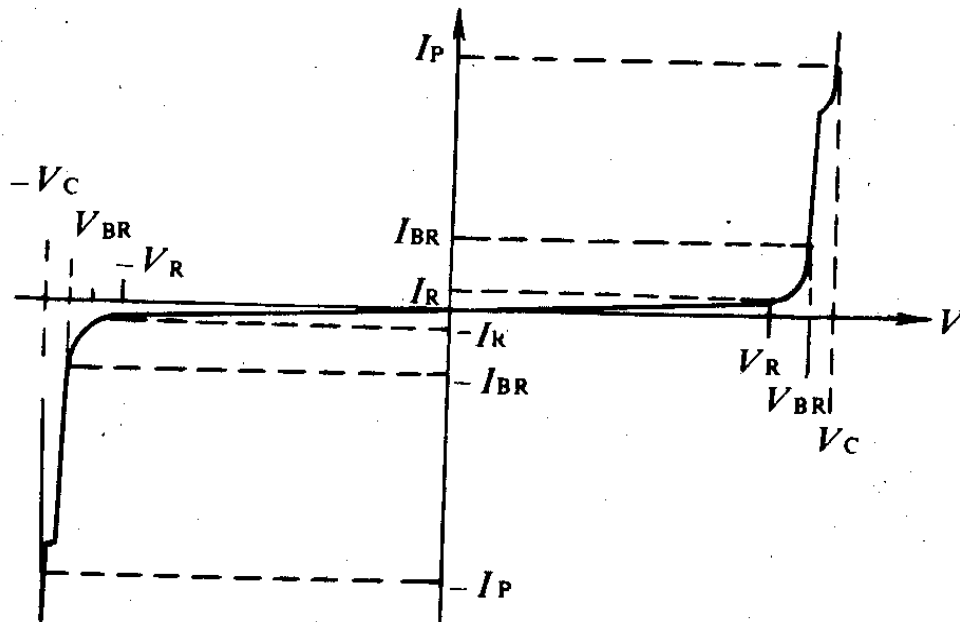
■ 常用防护元件

- 瞬变电压抑制（TVS）二极管：防浪涌，常用于器件级保护和板级保护
- 氧化锌压敏电阻（变阻器）：防浪涌，常用于整机级高压保护
- PTC热敏电阻：过热保护
- NTC功率热敏电阻：冷浪涌保护
- 铁氧体磁珠：高频干扰保护

8.2 瞬变电压抑制二极管

类

- 单向：用于直流电路
- 双向：用于交流电路

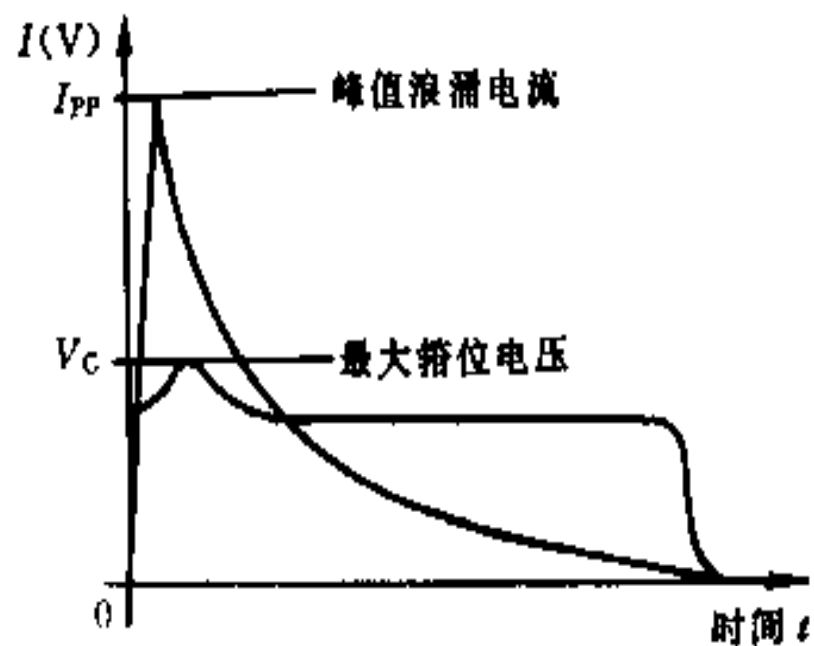


I-V特性

8.2 瞬变电压抑制二极管

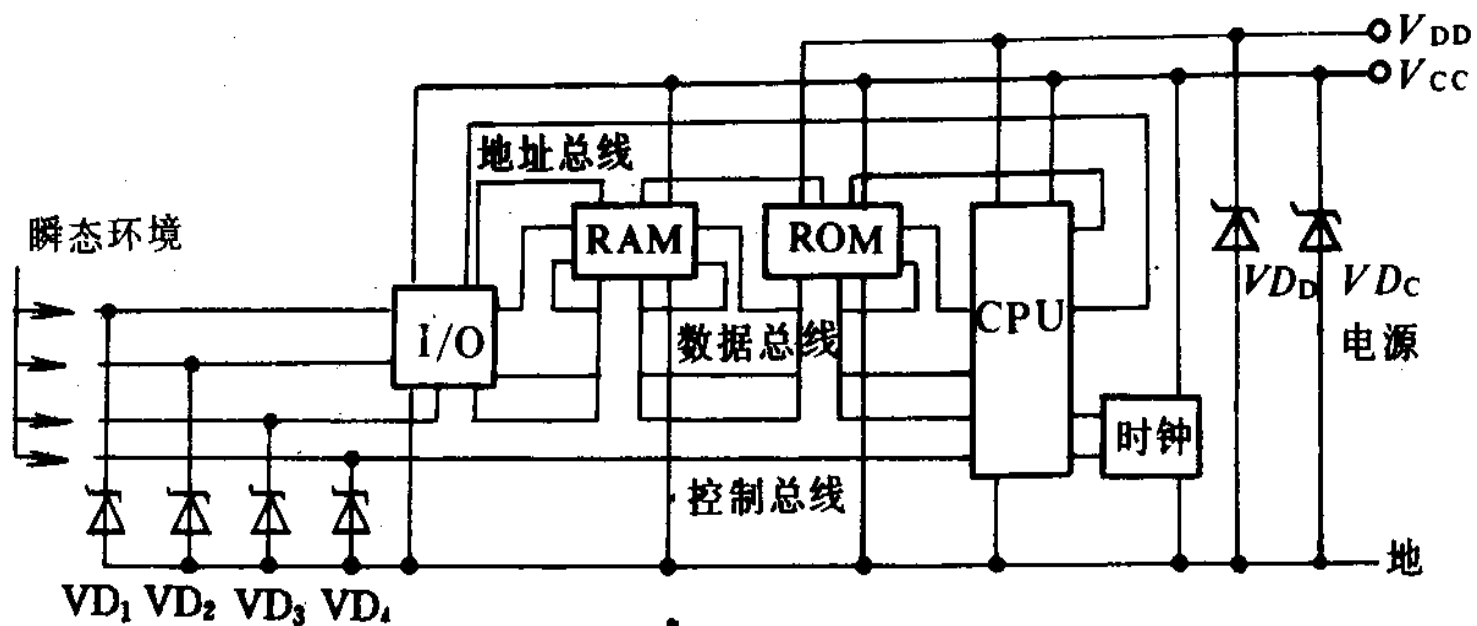
主要参

- 保护电压6~200V
- 最大电流1~150A
- 吸收功率500~1500W
- 响应时间<5ns

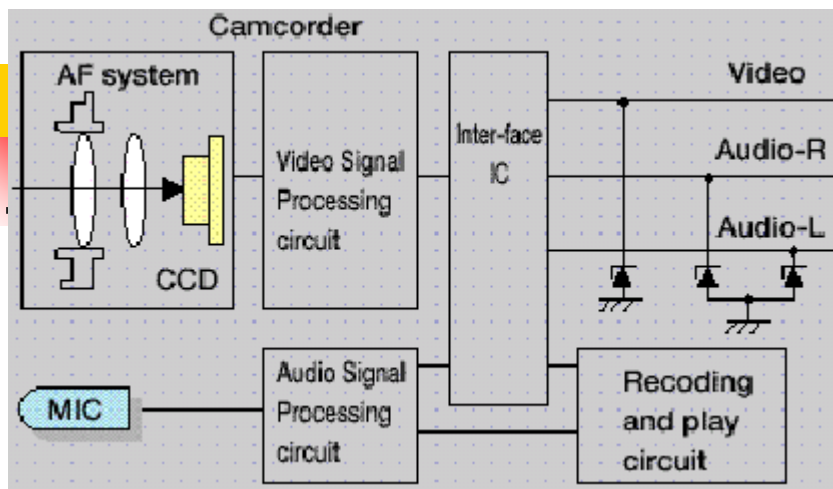


8.2 瞬变电压抑制二极管

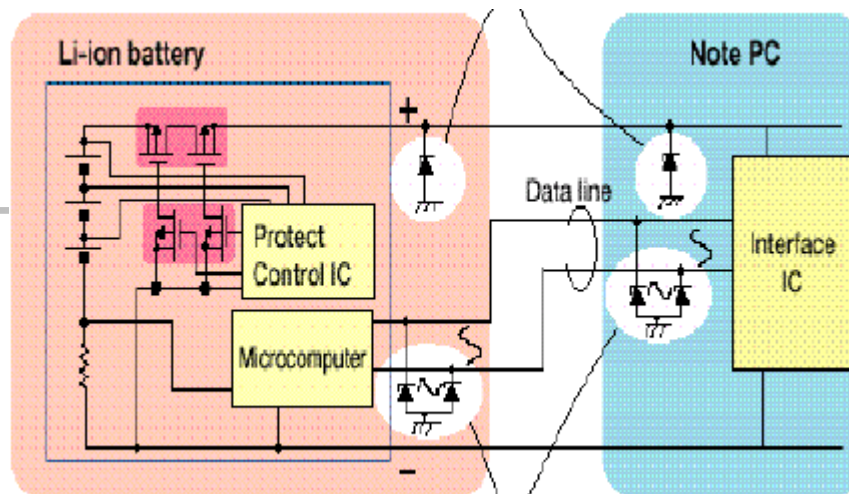
应用实例



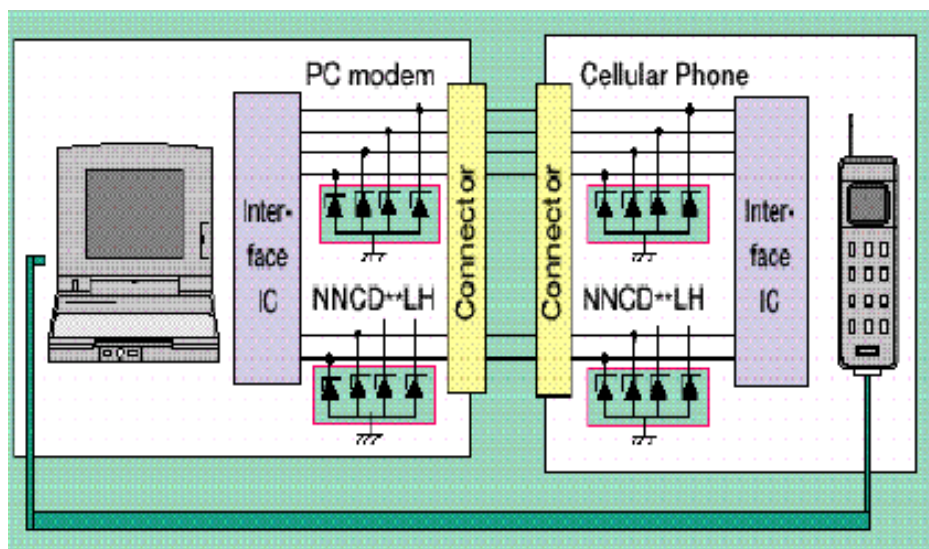
计算机系统



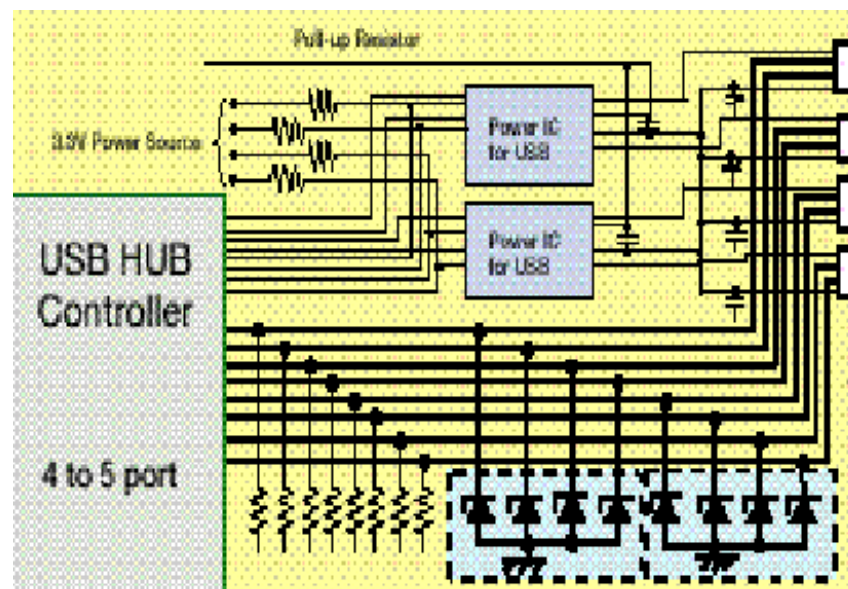
摄像机



笔记本电脑



移动电话



USB Hub

8.3 压敏电阻

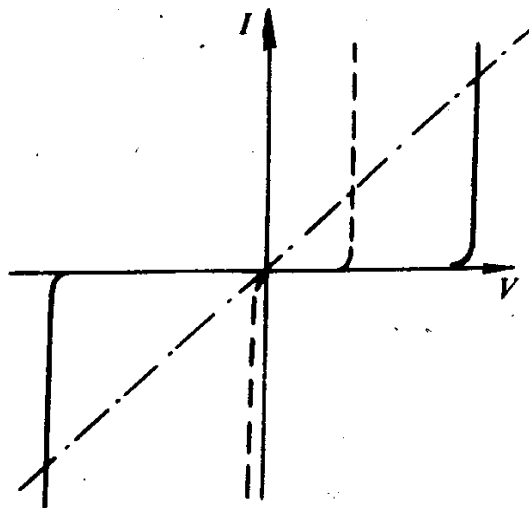
主要性能

■ 分类

- 氧化锌压敏电阻
- 碳化硅压敏电阻

■ 参数

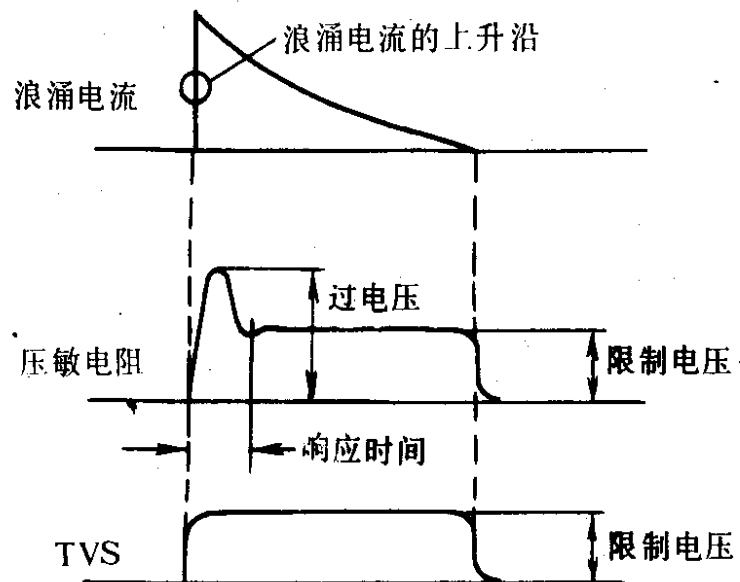
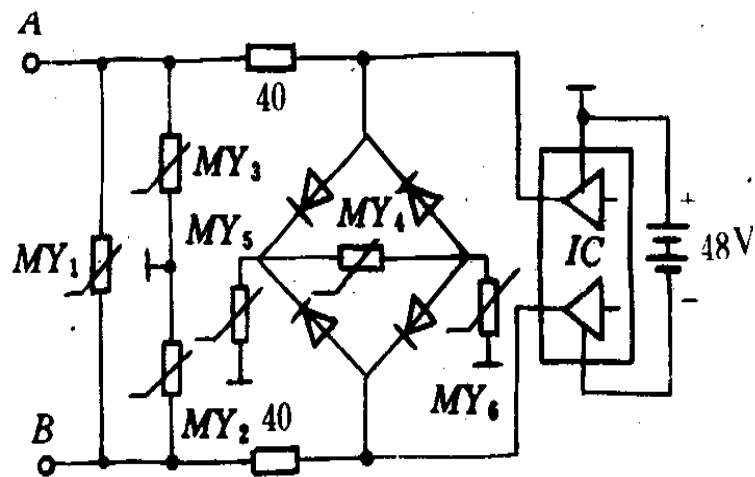
- 保护电压30~5000V
- 电流容量1~20kA
- 能量容量1000J/cm³
- 响应时间25ns~2us



■ 用途

- 作用：浪涌保护、防雷、灭弧、消噪
- 低压电器保护：电视机、计算机、电话机、保安系统
- 高压电器保护：发电机、变压器、配电盘、变频电源

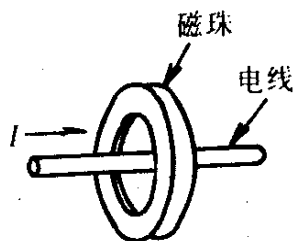
8.3 压敏电阻 与TVS的区别



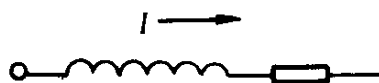
- 压敏电阻：耐压高，电流容量大
- TVS：响应速度快，漏电流小

8.4 铁氧体磁珠

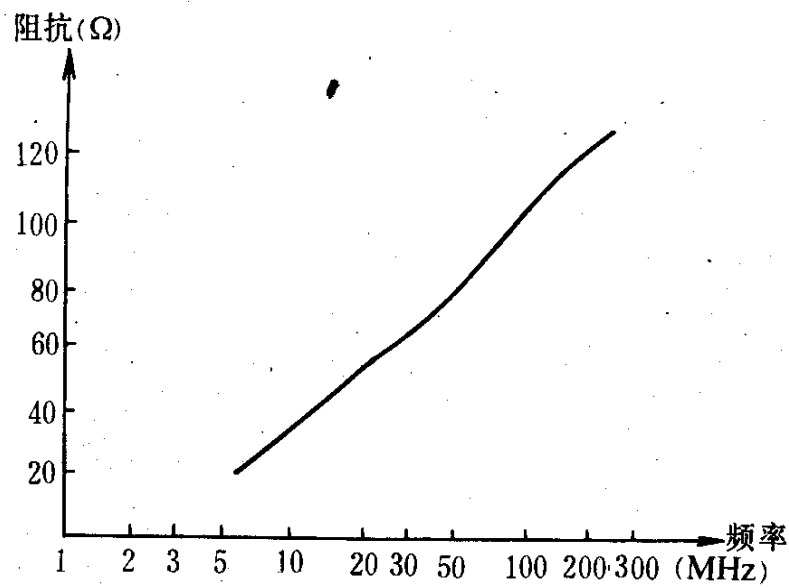
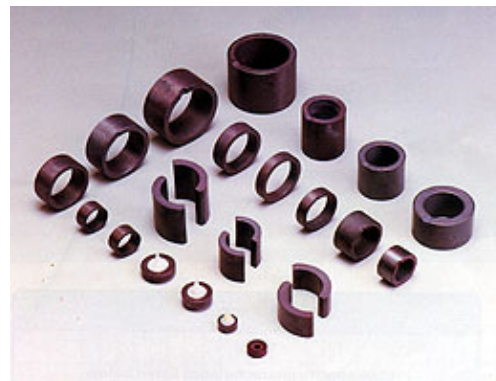
基本特性



(a)



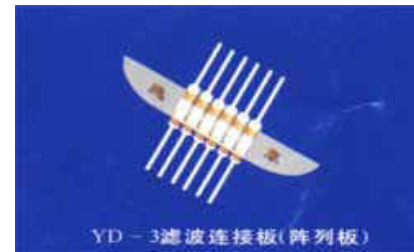
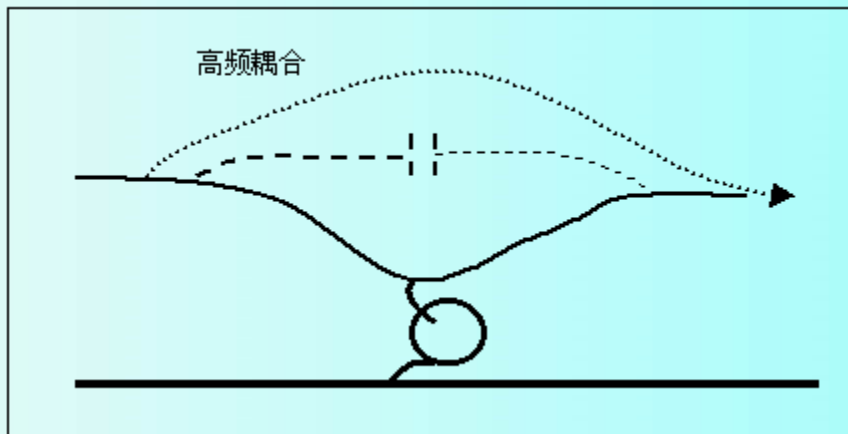
(b)



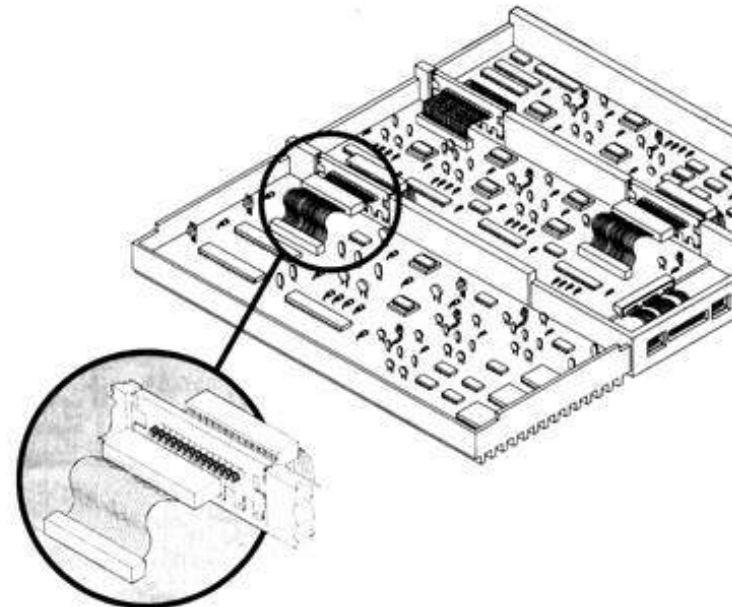
- 抑制高频噪声与干扰
- 滤除高频谐波
- 整形
- 不影响直流与低频信号
- 价格低廉
- 使用方便
- 注意散热

8.4 铁氧体磁珠

穿心电容

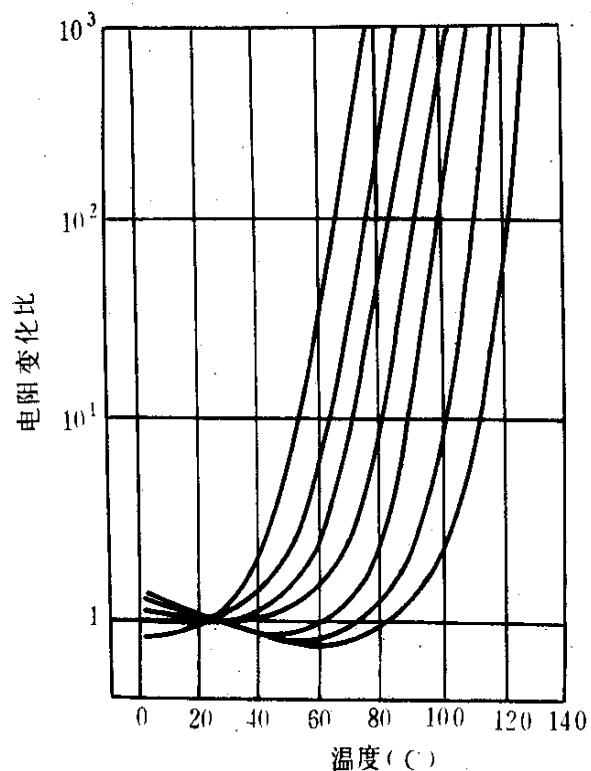


- 普通电容抑制高频噪声差的原因
 - 电容引线电感降低了电容谐振频率
 - 导线间寄生电容产生高频耦合
- 穿心电容高频滤波效果好的原因
 - 无引线电感
 - 无寄生电容
 - 屏蔽容易



8.5 PTC热敏电阻

基本特性



■ 参数 (BaTiO₃陶瓷材料制作)

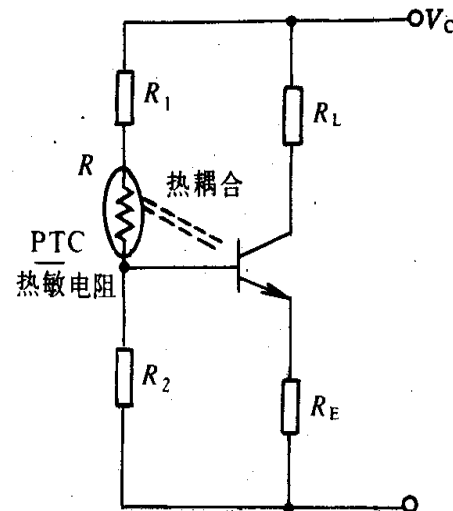
- 常温阻值：几百~几千欧姆
- 转换温度：60~120°C
- 温度系数：20~60%/°C

■ 类型

- 螺丝固定型
- 分立元件型
- 表面安装型

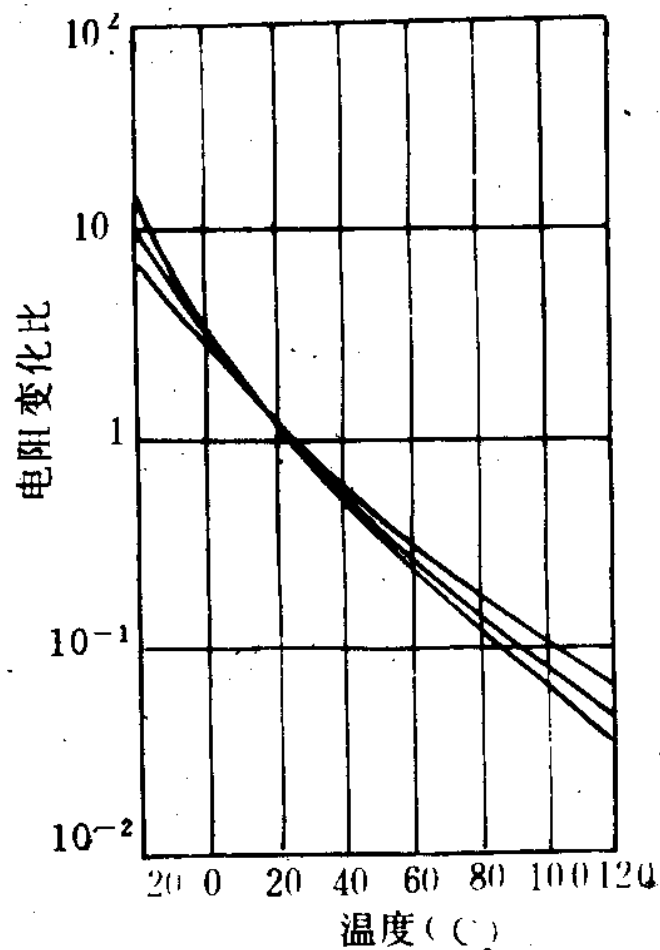
■ 用途

- 过热检测与保护
- 过流检测与保护
- 自恢复保险丝



8.6 NTC功率热敏电阻

基本特性



■ 参数

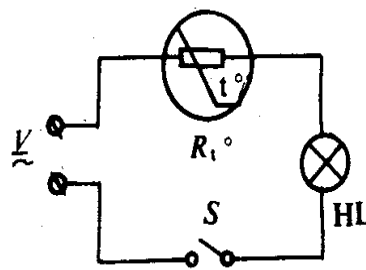
- 最大稳定电流: 1~10A
- 零温度电阻值: 1~50Ω
- 热时间常数: 与电流容量有关

■ 性能

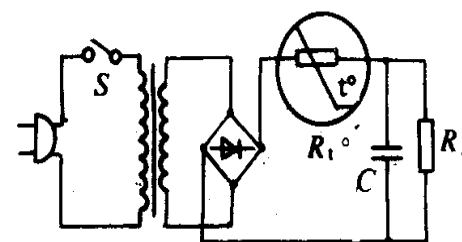
- 初始电阻大
- 通过大电流发热后电阻小

8.6 NTC功率热敏电阻应用

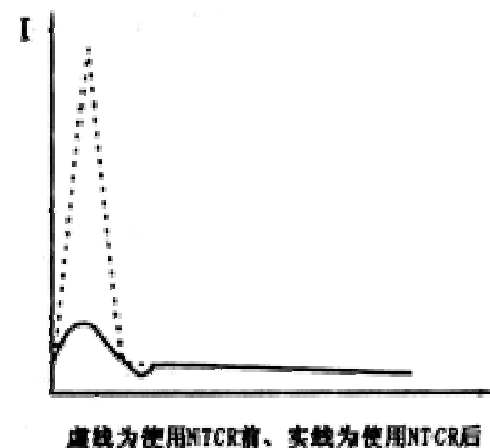
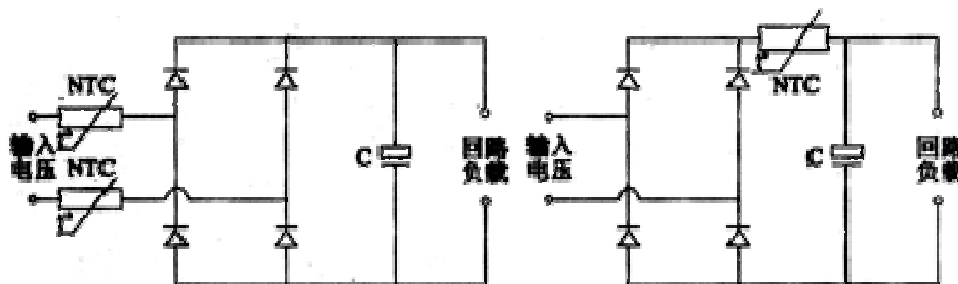
- 过冲电流检测与保护
- 浪涌电流抑制
- 白炽灯的冷启动
- 整流电源的启动保护



(a)



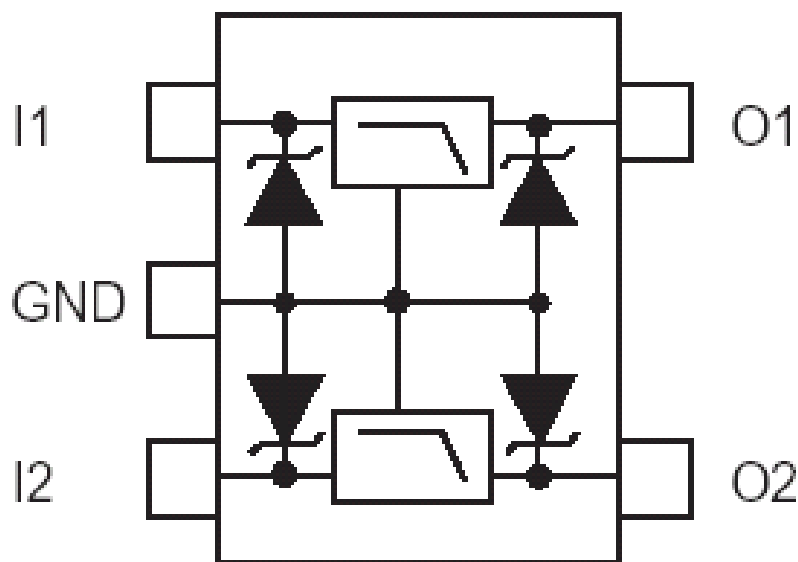
(b)



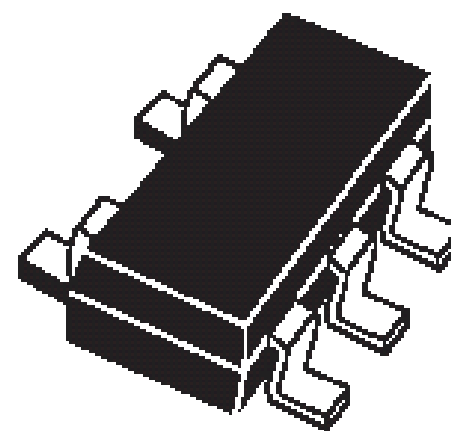
8.7 集成化保护元件

多功能保

■ EMI滤波+ESD保护



$R_{I/O} = 100\Omega$
 $C_{IN} = 50pF$

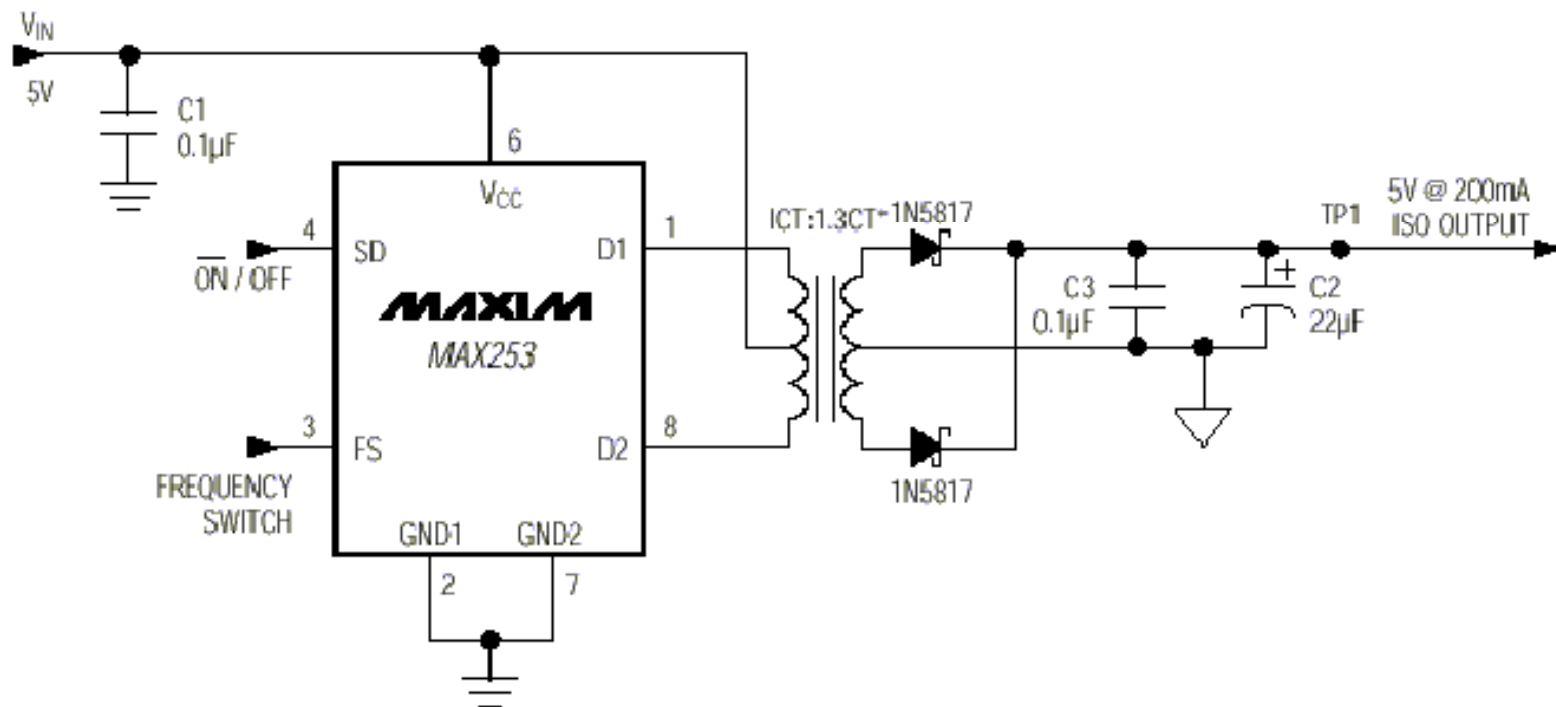


SOT323-5L

8.7 集成保护元件 隔离器件

专用隔

陡峭的上升时间 (30A/ns)可在地线电感(1nH/cm)上产生数百伏的感应电压



采用驱动IC与一个小的变压器从5V电源产生一个隔离的5V电源（隔离电压1kV)

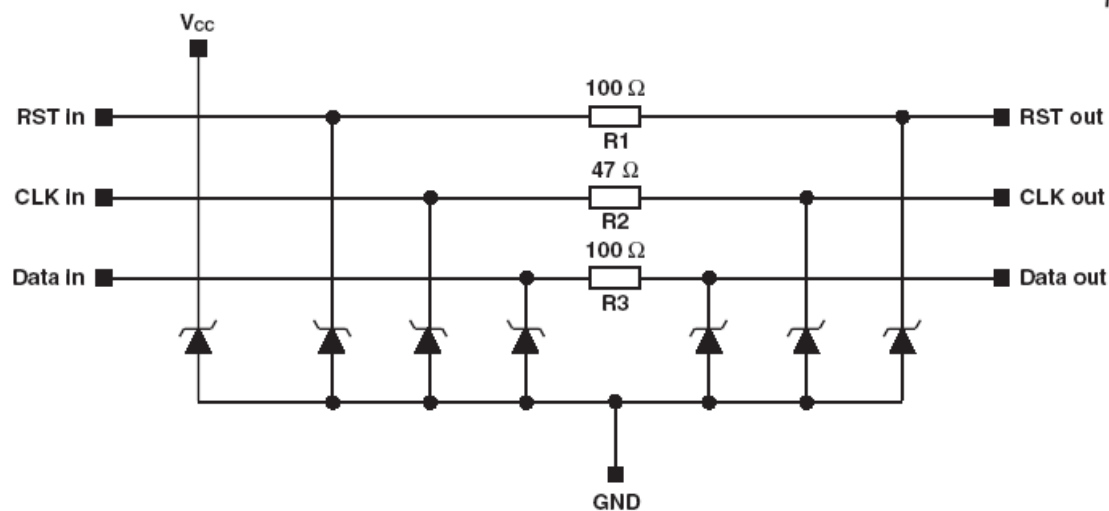
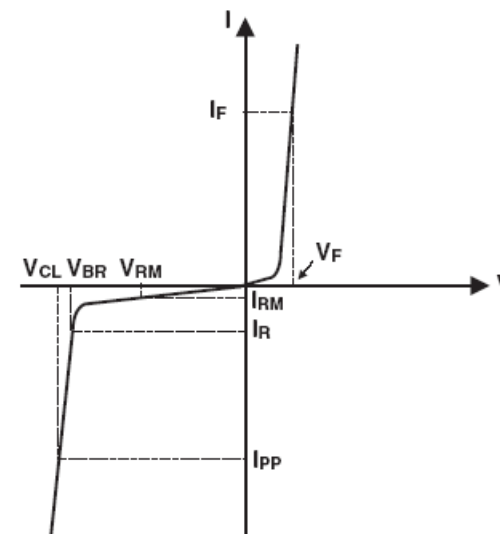
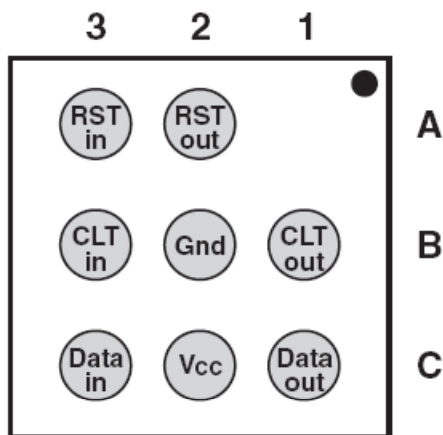
8.7 集成保护元件

实例:EMIF03—

SIM01



Flip Chip package

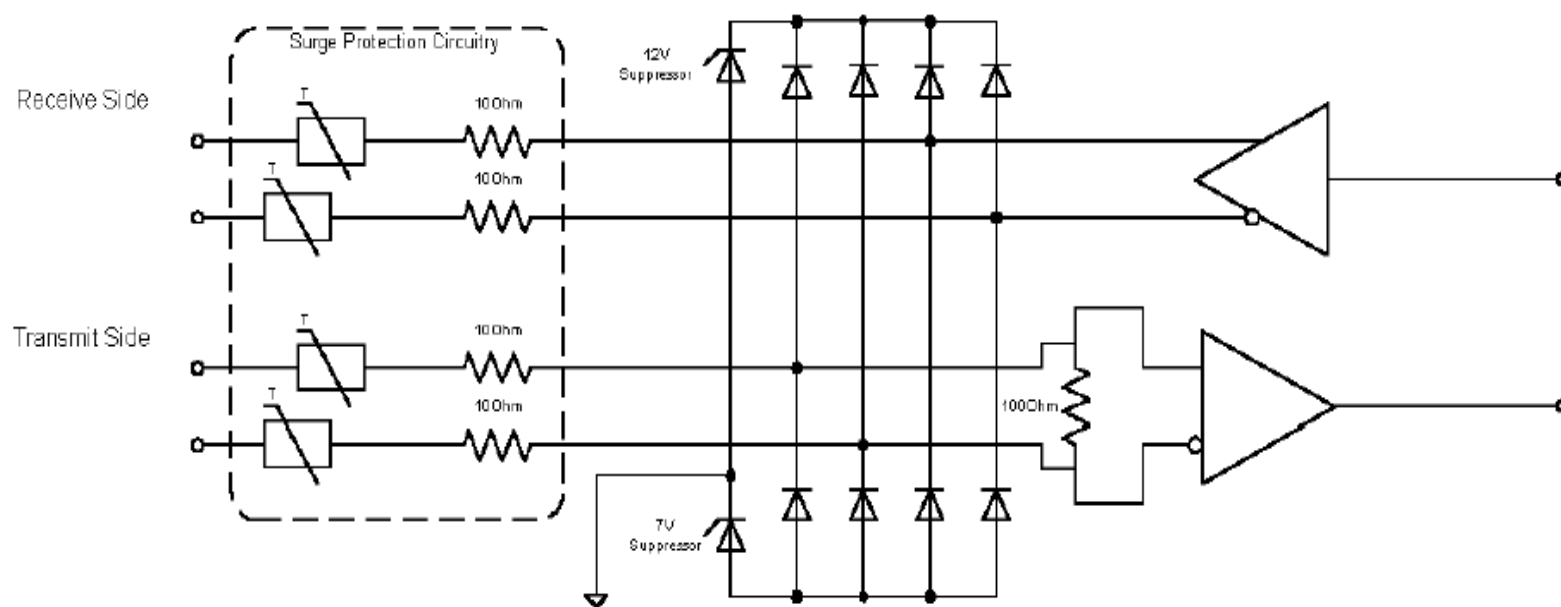


3线EMI滤波器/ESD防护器

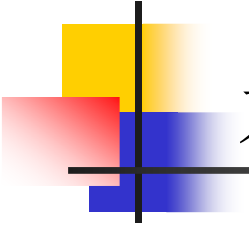
ST公司制造

8.7 集成保护元件

通信系统的收发端保护



- 保护器件：热敏电阻，限流电阻，TVS，缓冲IC（如MAX490E）
- 保护类型：静电，浪涌，快速上升信号



本次课完

- 回顾讲过的内容。
- 参考补充：
- 参考庄老师的ppt