

MOSFET 常见应用问题解答

部 门：技术部

版本号：Rev 1.0

单 位：成都方舟微电子有限公司

目录

一、 MOSFET 产品简介	3
1.1 MOSFET 基础知识简述	3
1.2 ARK 公司的 MOSFET 产品简介	4
二、 MOSFET 使用过程中的常见问题	4
2.1 初次接触耗尽型 MOSFET 时，怎样避免与增强型 MOSFET 混淆？	4
2.2 耗尽型 MOSFET 与 JFET 的 D、S 管脚一样具有对称性吗？	5
2.3 耗尽型 MOSFET 与 JFET 的栅极-源极结构近似吗？	5
2.4 耗尽型 MOSFET 实现过流、过压保护的应用方式及原理是什么？	5
2.4.1 输出电压值不固定的过流、过压保护的应用方式及原理	5
2.4.2 输出电压值固定的过流、过压保护的应用方式及原理	6
2.4.3 怎样利用耗尽型 MOSFET 实现双向过流、过压保护？	7
2.5 常见的使用耗尽型 MOSFET 给 IC 供电的方式有哪些？	7
2.5.1 使用耗尽型 MOSFET 搭配 LDO 给 IC 供电.....	7
2.5.2 使用耗尽型 MOSFET 构成电流源给 IC 供电	8
2.5.3 利用耗尽型 MOSFET 的超（较）高亚阈值特性给 IC 供电.....	9
2.6 为什么 MOSFET 的 ESD 能力值得被关注？	9
2.7 MOSFET 发生失效时，有哪些常见的失效现象及原因呢？	10
2.7.1 MOSFET 因受到外部机械应力而出现损伤的现象及原因分析.....	10
2.7.2 MOSFET 因受到过电应力而出现损伤的现象及原因分析.....	10
2.8 耗尽型 MOSFET 选型时常见参数的解读.....	11

一、MOSFET 产品简介

1.1 MOSFET 基础知识简述

MOSFET (Metal - Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) 是金属-氧化物半导体场效应晶体管的英文缩写，由多数载流子参与导电，也称为单极型晶体管，它属于电压控制型半导体器件。根据导电沟道类型和栅极驱动电压的不同，可以分为 N 沟道-增强型 MOSFET、N 沟道-耗尽型 MOSFET、P 沟道-增强型 MOSFET、P 沟道-耗尽型 MOSFET 四种类型。

四种类型的 MOSFET 的电路符号如下：

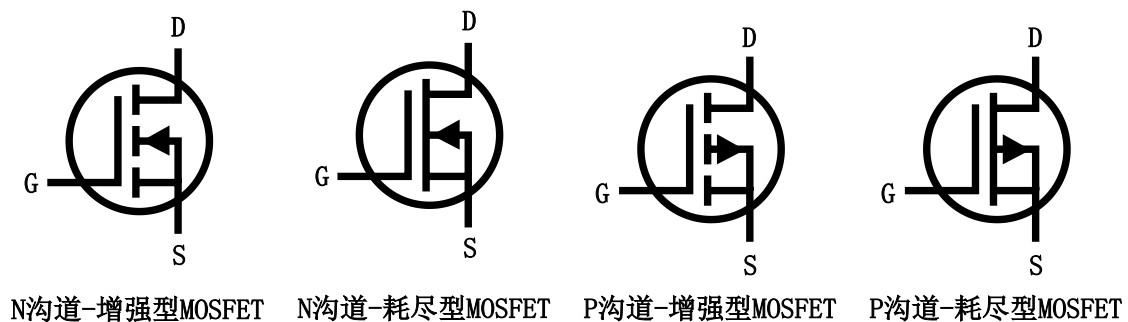


图 1. 不同类型 MOSFET 的电路符号

四种类型的 MOSFET 的主要区别如下：

- N 沟道-增强型 MOSFET：导电沟道是 N 型半导体，开通电压 $V_{th} > 0V$ 。当栅-源电压 $V_{GS} = 0V$ 时，其导电沟道尚未形成，器件处于关断状态；当外加栅-源电压 $V_{GS} > V_{th}$ 时，其导电沟道因反型而形成，器件处于开通状态。由于在栅-源电压零偏时，器件处于关断状态，增强型器件又称为“常关” (Normally Off) 器件。
- N 沟道-耗尽型 MOSFET：导电沟道是 N 型半导体，关断电压 $V_{GS(OFF)} < 0V$ 。当栅-源电压 $V_{GS} = 0V$ 时，其导电沟道就已经存在，器件处于导通状态；当外加栅-源电压 $V_{GS} < V_{GS(OFF)}$ 时，其导电沟道因耗尽而消失，器件处于关断状态。由于在栅-源电压零偏时，器件处于导通状态，耗尽型器件又称为“常开” (Normally On) 器件。
- P 沟道-增强型 MOSFET：导电沟道是 P 型半导体，开通电压 $V_{th} < 0V$ 。当栅-源电压 $V_{GS} = 0V$ 时，其导电沟道尚未形成，器件处于关断状态；当外加栅-源电压 $V_{GS} < V_{th}$ 时，其导电沟道因反型而形成，器件处于开通状态。

- P 沟道-耗尽型 MOSFET：导电沟道是 P 型半导体，关断电压 $V_{GS(OFF)} > 0V$ 。当栅-源电压 $V_{GS}=0V$ 时，其导电沟道就已经存在，器件处于导通状态；当外加栅-源电压 $V_{GS} > V_{GS(OFF)}$ 时，其导电沟道因耗尽而消失，器件处于关断状态。

1.2 ARK 公司的 MOSFET 产品简介

ARK 公司研发销售的 MOSFET 产品主要以 N 沟道-耗尽型 MOSFET 为主（包括具有自主知识产权的高阈值电压（UltraVt®）耗尽型 MOSFET 系列产品），以及 N 沟道-增强型 MOSFET 和 P 沟道-增强型 MOSFET。产品耐压等级覆盖 0~1200V 区间。

ARK 公司的 MOSFET 产品大部分都具有栅极 ESD 保护设计，在一定程度上能够有效避免客户在元件贴装过程中或使用过程中因 ESD 而出现的产​​品失效，具有 ESD 保护设计的 MOSFET 在产品结构示意图上有如下特征：

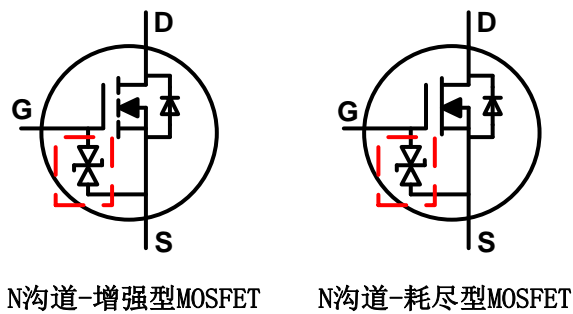


图 2. 具有 ESD 保护设计的 MOSFET 结构示意图

二、 MOSFET 使用过程中的常见问题

2.1 初次接触耗尽型 MOSFET 时，怎样避免与增强型 MOSFET 混淆？

部分客户在初次接触耗尽型 MOSFET 时，若未先行查看其产品规格书，则可能会按照测试增强型 MOSFET 的方式直接对其进行测试，由于耗尽型 MOSFET 在栅极零偏压时为导通状态，因此会认为器件属于失效产品。

常用的区分方法是：

- 查阅产品规格书，通过规格书中的介绍和参数定义进行判断。
- 可直接在 G 极浮空的情况下，使用万用表对 MOSFET 的 D-S 导通状态进行测量，若测得 MOSFET 的 D-S 为导通状态，且所测阻值约为产品规格书中定义的导通电阻值，则表明该 MOSFET 为

耗尽型 MOSFET；若测得 MOSFET 的 D-S 为开路状态，则表明该 MOSFET 为增强型 MOSFET。

2.2 耗尽型 MOSFET 与 JFET 的 D、S 管脚一样具有对称性吗？

JFET 的 D、S 管脚通常是对称的，即 D、S 管脚在使用时可以互换；而 ARK 公司的耗尽型 MOSFET 的 D、S 管脚不具有对称性，在使用时 D、S 管脚不能互换。对于 N 沟道-耗尽型 MOSFET，当电流方向为 D→S 时，电流仅能从沟道流过；当电流方向为 S→D 时，电流较小时从沟道流过（体二极管未导通），电流较大时，会同时从沟道和体二极管流过；N 沟道-耗尽型 MOSFET 关断后只能阻断 D→S 方向的电压。

2.3 耗尽型 MOSFET 与 JFET 的栅极-源极结构近似吗？

JFET 的 G-S、G-D 之间的结构为 PN 结，而耗尽型 MOSFET 属于绝缘栅结构，MOSFET 的栅极与半导体材料之间隔着栅氧化层，因此通常认为 MOSFET 的输入阻抗远大于 JFET。另外因为这种结构上的差异，使得 JFET 在一定条件下，其 G-S 可以作为二极管使用，而耗尽型 MOSFET 的 G-S 则无法作为二极管使用。

实际上 MOSFET 的输入阻抗还和芯片本身的结构及芯片大小相关，ARK 公司研发的 MOSFET 大多具有 ESD 保护设计，在 MOSFET 的 G-S 间并联有 ESD 保护二极管，因此我们会在其产品规格书中看到部分 MOSFET 的 I_{GSS} 漏电流可能会达到微安级。

2.4 耗尽型 MOSFET 实现过流、过压保护的应用方式及原理是什么？

2.4.1 输出电压值不固定的过流、过压保护的应用方式及原理

常见的利用耗尽型 MOSFET 实现过流、过压保护的应用方式如下：

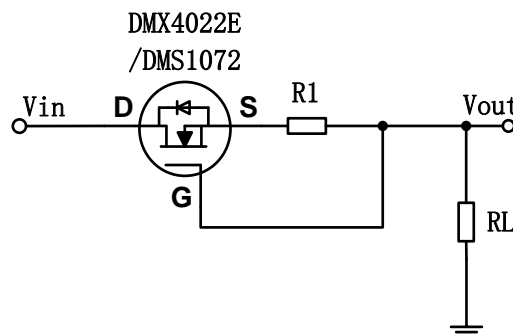


图 3. 耗尽型 MOSFET 实现过流、过压保护的应用电路

（注：电路示意图中仅以 ARK 个别型号为例，具体电路的产品选型可咨询 ARK 公司，下同。）

电路原理及注意事项如下：

- 如图 3 所示电路是利用耗尽型 MOSFET 的亚阈值电压特性实现过流、过压保护的。当电路工作时，电阻 R1 两端的电压值 ($V_{R1} = -V_{GS}$) 不会超出耗尽型 MOSFET 的阈值电压范围 (即 $0 \leq V_{R1} \leq |V_{GS(OFF)}|$)，因此，通过 R1 的电流也会被限制在一定范围内 ($I = V_{R1}/R1$)，这样就实现了对电路的限流保护。
- 通常在确定了电路允许通过的最大电流值后，我们可以结合该 MOSFET 产品规格书中 $V_{GS} \leq 0V$ 部分的 (典型) 输出特性曲线，根据“MOSFET 能够通过的最大电流值约等于特定栅-源电压下对应输出曲线的饱和电流值”这一特性，来估算 R1 的设定值。
- 需要注意的是，该电路输入电压的最大值 (包括浪涌信号) 不能超过所用 MOSFET 的击穿电压值。此外，MOSFET 的电流在达到饱和以后，额外的输入电压会全部降落到 MOSFET 的 D-S 两端 (实现过压保护)，因此需要确保 MOSFET 工作时的耗散功率不能超过其额定功率 (应保留一定安全裕量)。

2.4.2 输出电压值固定的过流、过压保护的应用方式及原理

常见的利用耗尽型 MOSFET 实现过流、过压保护，且稳压输出的应用方式如下：

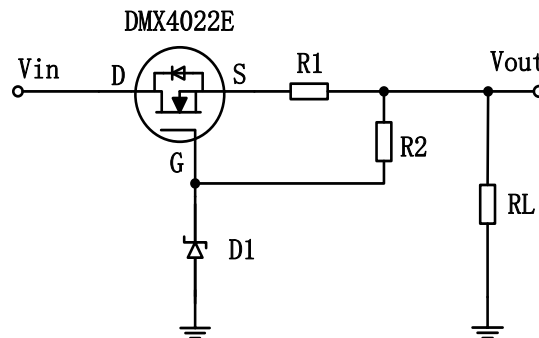


图 4. 耗尽型 MOSFET 实现过流过压保护、且稳压输出的应用电路

电路原理及注意事项如下：

- 该电路实现过流、过压保护的主要原理与图 3 电路基本一致。
- 当输入电压满足稳压需求时，输出电压 $V_{out} \approx V_{Z_{D1}} + |V_{TH}|$ 。而且由于 MOSFET 的亚阈值电压特性，R2 两端的电压值会被限制，因此在 R2 电阻值较大的情况下，可以有效控制流过稳压管 D1 的电流，以减少功耗。
- 由于 MOSFET 本身的功耗限制，该电路在应用时需要格外注意 MOSFET 本身的功耗问题。

2.4.3 怎样利用耗尽型 MOSFET 实现双向过流、过压保护？

若要实现双向过流过压保护，可采用如下方式电路：

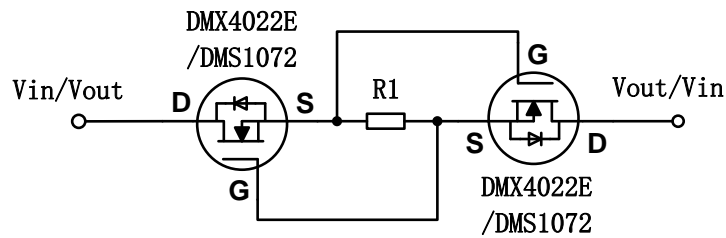


图 5. 耗尽型 MOSFET 实现双向过流、过压保护的应用电路

电路原理如下：

- 该电路实现过流、过压保护的主要原理与图 3 电路基本一致。不过当电路触发过流、过压保护功能时，仅是电流方向为 D→S 的 MOSFET 实现保护作用。对于另外一颗 MOSFET，当电流较小、其体二极管还未正向导通时，电流会从其沟道流过；当其体二极管正向导通后，电流会同时从沟道、体二极管流过。

2.5 常见的使用耗尽型 MOSFET 给 IC 供电的方式有哪些？

2.5.1 使用耗尽型 MOSFET 搭配 LDO 给 IC 供电

应用电路如下：

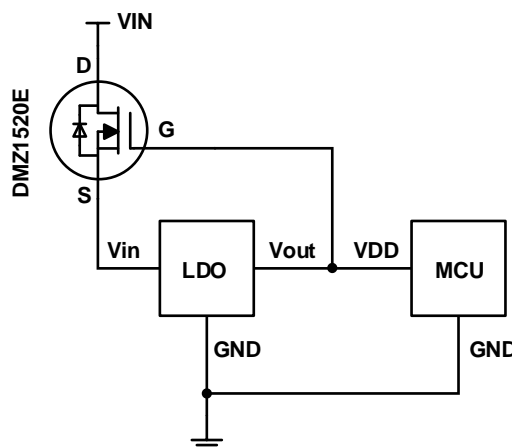


图 6. 耗尽型 MOSFET 搭配 LDO 给 IC 供电

电路原理及注意事项如下：

- 如图所示，仅使用一颗耗尽型 MOSFET 器件，即可将较高的输入电压转换为稳定的低电压提

供给 LDO 电路输入端，使得低电压等级的 LDO 也可以工作在输入电压较高的环境下。LDO 的输入电压与输出电压的关系满足： $V_{in}=V_{out}+|V_{th}|$ 。该电路方案同时可以为 LDO 和负载提供瞬态浪涌保护。

- 需要注意的是，由于耗尽型 MOSFET 本身的功耗限制，当 LDO 的工作电流较大时，输入电压则不能过高，MOSFET 的实际功耗不能超过其额定功耗（应保留一定裕量）。

2.5.2 使用耗尽型 MOSFET 构成电流源给 IC 供电

常见应用方式如下：

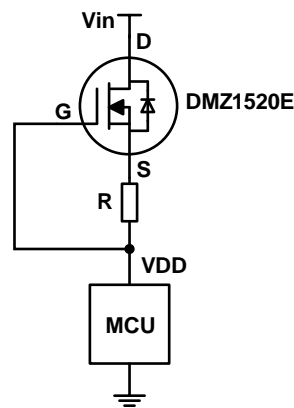


图 7. 耗尽型 MOSFET 构成电流源给 IC 供电的应用电路

电路原理及注意事项如下：

- 当电路工作时，电阻 R 两端的电压会随着流过的电流的增加而升高，但是由于耗尽型 MOSFET 的亚阈值特性，其最大电压值不会超过对应电流下的阈值电压，即 $V_{R_MAX}=|V_{TH}|$ 。因此在该条件下，上述应用可以作为恒流源给 IC 供电。
- 由于 MOSFET 的功耗限制，该应用不适合大功率供电场景，实际应用时电流会随着 MOSFET 结温的变化而存在轻微波动。

2.5.3 利用耗尽型 MOSFET 的超（较）高亚阈值特性给 IC 供电

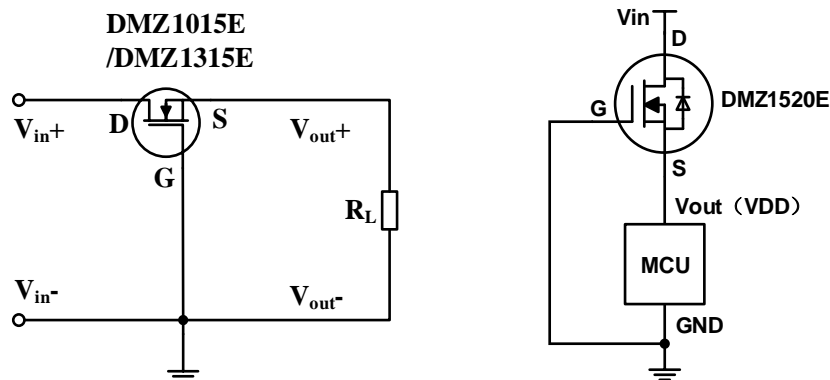


图 7. 利用耗尽型 MOSFET 的高阈值电压特性直接给 IC 供电的应用电路

电路原理及注意事项如下：

- 当输入电压较低时 ($V_{in} < |V_{th}|$)，MOSFET 的 D-S 两端的压降较低，输出电压 $V_{out} \approx V_{in}$ 。当输入电压 $V_{in} > |V_{th}|$ 时，由于耗尽型 MOSFET 的亚阈值电压特性，输出电压会被钳位，即 $V_{out} = |V_{th}|$ 。因此上述电路可以作为 DC-DC 元件直接给 IC 供电。
- 图中所示的 DMZ1015E/DMZ1315E 的阈值电压较高，适合给输入电压范围约 8V~25V 的 IC 供电，DMZ1520E 的阈值电压稍低，适合给供电电压范围约 2.7V~5.5V 的 IC 供电。
- 应用时需注意 MOSFET 的功耗限制，不适合大功率供电场景。

2.6 为什么 MOSFET 的 ESD 能力值得被关注？

MOSFET 是绝缘栅器件，栅极通过薄氧化层和其他电极之间绝缘。如果栅氧化层有较高的电压，会造成氧化层击穿，使器件永久损坏。特别是外界各种杂散电荷会在栅极上积累，由于 MOS 晶体管的栅电容通常较小，只要少量的电荷就能形成很大的等效栅压，引起器件和电路失效，因此自身带有静电保护功能的 MOSFET 在应用中特别重要。

在对 MOSFET 进行了 ESD 保护设计后，其 G-S 阻抗会相对降低一些，但通常仍会大于 $10^7 \Omega$ （因 ESD 能力不同而存在差异）。但是当 MOSFET 发生 ESD 失效后，其 G-S 阻抗通常会明显降低，使用万用表测量时可测得的阻抗明显低于 $M \Omega$ 级，甚至 G-S 近似短路，因此通常我们可以采用这种测量方式进行初步判断（同时与合格品的参数进行对比）。

根据芯片大小不同及 ESD 设计结构差异，MOSFET 的 ESD 能力会存在强弱差异，另外具有 ESD 保护设计的 MOSFET，在出现超出其设计能力的 ESD 时，同样会发生失效。

2.7 MOSFET 发生失效时，有哪些常见的失效现象及原因呢？

2.7.1 MOSFET 因受到外部机械应力而出现损伤的现象及原因分析

因外部机械应力而出现损伤的外观表现：常见的因外部机械应力而失效的 MOSFET 的外观表现为：MOSFET 器件管脚出现扭曲、变形、断裂等现象；MOSFET 塑封体出现裂纹、破碎、异常划痕等现象；MOSFET 外观无明显异常现象，但失效是发生在抗冲击性实验（如跌落试验）之后等。

常见失效原因排查：通常 MOSFET 因外部机械应力而发生失效时，会呈现出失效样品数量较多、失效样品的外观损伤表现较一致的现象。常见的机械应力来源包括：（1）器件在运输过程出现挤压碰撞，导致器件出现损伤，这样的损伤一般可以在原材料检验阶段发现；（2）贴片机调试不当也可能出现 MOSFET 结构受损的现象；（3）半成品电路板转运时出现挤压、磕碰等现象，也可能导致 MOSFET 出现结构损伤现象；（4）电路板布局不合理，如 MOSFET 旁边有重量大、体积大的直插件，而 MOSFET 刚好位于电路板受力形变处（或位于电路板与外壳、支架的应力传导处），此时 MOSFET 也可能会因受力而出现结构损伤。

2.7.2 MOSFET 因受到过电应力而出现损伤的现象及原因分析

过电应力导致的失效现象一：MOSFET 栅极失效。

失效现象：MOSFET 的栅极氧化层是最薄弱且容易出现问题的部位，浪涌、静电等均可对其造成破坏，而且损伤后往往表现为微观异常现象，普通的分析手段通常无法清晰地展现出缺陷形貌。栅极失效通常会导导致栅-源漏电流增加、栅-源短路、漏-源漏电流增加或漏-源被热击穿而短路、MOSFET 无法开启或无法关断等现象。

失效原因排查：当 MOSFET 出现栅极失效时，通常表现为栅极-源极阻抗急剧降低或近似短路的现象，我们可以使用万用表进行测量以辅助判断。常见的过电压主要为栅极外部出现过电压脉冲，可利用示波器辅助抓取过电压脉冲信号波形进行分析；引起栅极失效的静电主要包括人体携带的静电和机械设备携带的静电，静电通常是在器件贴装过程中引入。

过电应力导致的失效现象二：MOSFET 雪崩失效。

失效现象：雪崩失效后通常表现为栅极、源极、漏极互相短路，芯片表面出现较大击穿点但通常无高温导致的碳化、熔融等现象。

失效原因排查：雪崩失效通常发生在 MOSFET 的漏极-源极两端施加了大电压（包括电路中的感性负载产生的大电压）的情况下，通常可以使用示波器抓取电路信号波形进行分析。

过电应力导致的失效现象三：MOSFET 过流失效（包括瞬时过电压失效）。

失效现象：过流失效通常会导致 MOSFET 塑封体崩裂或碳化、键合点熔融、键合线熔断、芯片产生裂纹及芯片表面金属出现大面积融化等现象。

失效原因排查：过流失效通常发生在负载短路、脉冲过流、长时间高温运行的同时出现焊锡空洞等不稳定因素导致个别区域温度升高的情况下，其根本原因均可理解为过电流导致的局部高温烧蚀。

2.8 耗尽型 MOSFET 选型时常见参数的解读

耗尽型 MOSFET 选型相关的主要参数如下：

- BV_{DSX} ：漏极到源极的击穿电压，应选择能满足电路可靠运行且留有安全裕量的击穿电压 BV_{DSX} 。正常工作时施加在漏-源极两端的电压必须低于器件标称的漏-源极击穿电压，同时应留有一定的裕量，以适应正常的电压波动以及由于瞬态浪涌或干扰引起的各种电压尖峰。
- P_D ：器件可消耗的最大连续功率。功耗是在器件达到允许的最大结点温度，同时底座保持在 25°C 的情况下计算得到的。在选型时需确保器件在实际工作时的功耗不超过额定功耗，且保留安全裕量。
- I_{DSS} ：导通状态下最小的漏极-源极饱和电流标称值。 I_{DSS} 是在栅极-源极电压为零时 ($V_{GS}=0\text{V}$)，在特定的漏极-源极电压 (V_{DS}) 下通过的漏极电流，表示的是可以在漏极-源极之间通过的最大电流。选型时应确保在正常工作状态下，流过 MOSFET 的实际漏源极电流必须低于器件标称的漏-源极饱和电流 (I_{DSS})。
- $V_{GS(OFF)}$ ：栅极-源极截止电压。N 沟道耗尽型 MOSFET 具有负值的沟道截止电压，该参数被定义为 $V_{GS(OFF)}$ ，当栅极-源极电压 (V_{GS}) 反向增加，漏极电流将逐渐减小，直到施加的栅极-源极电压等于器件的截止电压时，MOSFET 停止导通。应根据栅极-源极电压的实际工作范围，选择合适的栅极-源极截止电压（或阈值电压） $V_{GS(OFF)}$ 的大小。