

# 基于漏极导通区特性理解 MOSFET 开关过程

Adlsong

**摘要：**本文先介绍了基于功率 MOSFET 的栅极电荷特性的开关过程；然后介绍了一种更直观明析的理解功率 MOSFET 开关过程的方法：基于功率 MOSFET 的导通区特性的开关过程，并详细的阐述了其开关过程。开关过程中，功率 MOSFET 动态的经过是关断区、恒流区和可变电阻区的过程。在跨越恒流区时，功率 MOSFET 漏极的电流和栅极电压以跨导为正比例系列，线性增加。米勒平台区对应着最大的负载电流。可变电阻区功率 MOSFET 漏极减小到额定的值。

**关键词：**功率 MOSFET，导通区特性，栅极电荷特性

**Abstract:** In this paper, the switching process of power mosfet is introduced based on its gate-charge characteristics. Then the intuitional and easy understood method based on its on-region characteristics is presented and discussed in detail. Power mosfet run to pass through three regions: turn off, constant current and. During constant current region, the drain current  $I_d$  varies with  $V_{gs}$  and  $I_d$  is proportional to  $V_{gs}$  with its transconductance  $g_{FS}$ .  $I_d$  will reach the maximum value at the region of miller platform. In the end  $R_{dson}$  will decrease to rating value gradually during the region of variable resistance.

**Key Words:** Power Mosfet, On-Region Characteristics, Gate-Charge Characteristics

## 1 MOSFET 的栅极电荷特性与开关过程

尽管 MOSFET 在开关电源、电机控制等一些电子系统中得到广泛的应用，但是许多电子工程师并没有十分清楚的理解 MOSFET 开关过程，以及 MOSFET 在开关过程中所处的状态。一般来说，电子工程师通常基于栅极电荷理解 MOSFET 的开通的过程，如图 1 所示。此图在 MOSFET 数据表中可以查到。

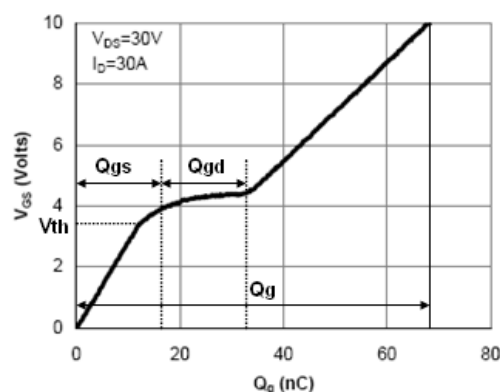


图1: AOT460栅极电荷特性

MOSFET的D和S极加电压为 $V_{DD}$ ，当驱动开通脉冲加到MOSFET的G和S极时，输入电容 $C_{iss}$ 充电，G和S极电压 $V_{gs}$ 线性上升并到达门槛电压 $V_{GS(th)}$ ， $V_{gs}$ 上升到 $V_{GS(th)}$ 之前漏极电流

$I_d \approx 0A$ ，没有漏极电流流过， $V_{ds}$  的电压保持  $V_{DD}$  不变。

当  $V_{gs}$  到达  $V_{GS(th)}$  时，漏极开始流过电流  $I_d$ ，然后  $V_{gs}$  继续上升， $I_d$  也逐渐上升， $V_{ds}$  仍然保持  $V_{DD}$ 。当  $V_{gs}$  到达米勒平台电压  $V_{GS(pl)}$  时， $I_d$  也上升到负载电流最大值  $I_D$ ， $V_{ds}$  的电压开始从  $V_{DD}$  下降。

米勒平台期间， $I_d$  电流维持  $I_D$ ， $V_{ds}$  电压不断降低。

米勒平台结束时刻， $I_d$  电流仍然维持  $I_D$ ， $V_{ds}$  电压降低到一个较低的值。米勒平台结束后， $I_d$  电流仍然维持  $I_D$ ， $V_{ds}$  电压继续降低，但此时降低的斜率很小，因此降低的幅度也很小，最后稳定在  $V_{ds} = I_d \times R_{ds(on)}$ 。因此通常可以认为米勒平台结束后 MOSFET 基本上已经导通。

对于上述的过程，理解难点在于为什么在米勒平台区， $V_{gs}$  的电压恒定？驱动电路仍然对栅极提供驱动电流，仍然对栅极电容充电，为什么栅极的电压不上升？而且栅极电荷特性对于形象的理解 MOSFET 的开通过程并不直观。因此，下面将基于漏极导通特性解 MOSFET 开通过程。

## 2 MOSFET 的漏极导通特性与开关过程

MOSFET 的漏极导通特性如图 2 所示。MOSFET 与三极管一样，当 MOSFET 应用于放大电路时，通常要使用此曲线研究其放大特性。只是三极管使用的基极电流，集电极电流和放大倍数，而 MOSFET 管使用栅极电压，漏极电流和跨导。

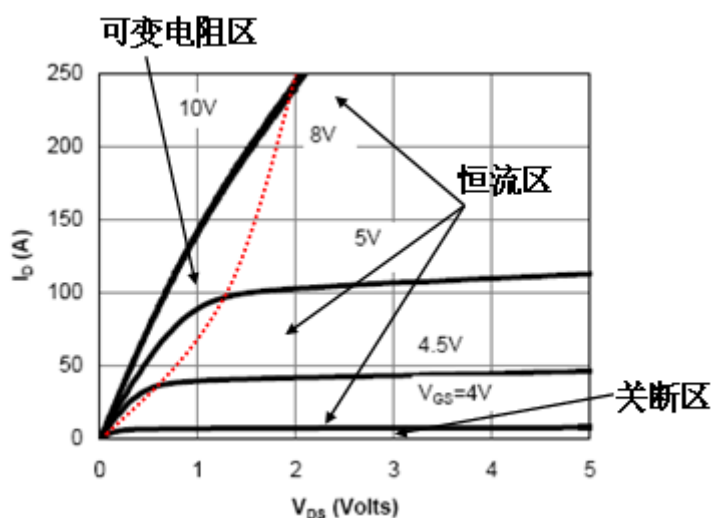


图 2: AOT460 的漏极导通特性

三极管有三个工作区：截止区，放大区和饱和区，而 MOSFET 对应是关断区，恒流区和可变电阻区。注意：MOSFET 恒流区有时也称饱和区或放大区。当驱动开通脉冲加到 MOSFET 的 G 和 S 极时， $V_{gs}$  的电压逐渐升高时，MOSFET 的开通轨迹 A-B-C-D 见图 3 的路线所示。

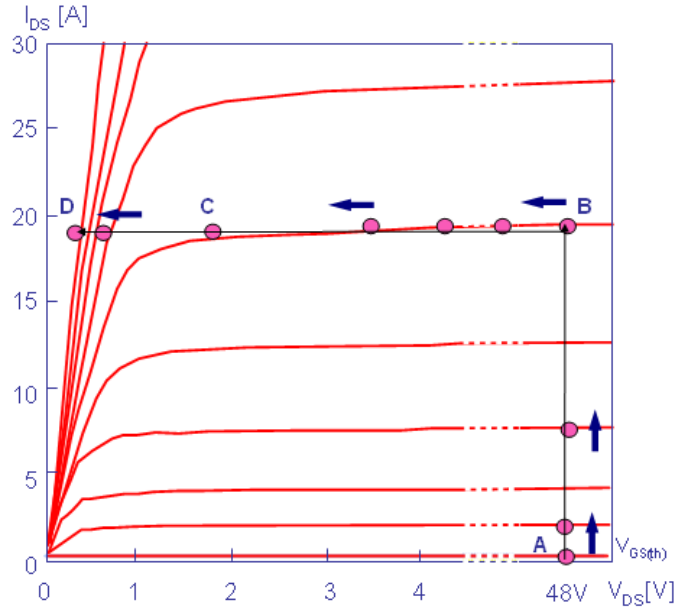


图 3: AOT460 的开通轨迹

开通前, MOSFET 起始工作点位于图 3 的右下角 A 点, AOT460 的  $V_{DD}$  电压为 48V,  $V_{gs}$  的电压逐渐升高,  $I_d$  电流为 0,  $V_{gs}$  的电压到  $V_{GS(th)}$ ,  $I_d$  电流从 0 开始逐渐增大。

A-B 就是  $V_{gs}$  的电压从  $V_{GS(th)}$  增加到  $V_{GS(pl)}$  的过程。从 A 到 B 点的过程中, 可以在非常直观的发现, 此过程工作于 MOSFET 的恒流区, 也就是  $V_{gs}$  电压和  $I_d$  电流自动找平衡的过程, 即:  $V_{gs}$  电压的变化伴随着  $I_d$  电流相应的变化, 其变化关系就是 MOSFET 的跨导:

$$g_{FS} = \frac{I_d}{V_{gs}}, \text{ 跨导可以在 MOSFET 数据表中查到。}$$

当  $I_d$  电流达到负载的最大允许电流  $I_D$  时, 此时对应的栅级电压  $V_{GS(pl)} = \frac{I_D}{g_{FS}}$ 。由于此

时  $I_d$  电流恒定, 因此栅极  $V_{gs}$  电压也恒定不变, 见图 3 中的 B-C, 此时 MOSFET 处于相对稳定的恒流区, 工作于放大器的状态。

开通前,  $V_{gd}$  的电压为  $V_{gs}-V_{ds}$ , 为负压, 进入米勒平台,  $V_{gd}$  的负电压绝对值不断下降, 过 0 后转为正电压。驱动电路的电流绝大部分流过  $C_{GD}$ , 以扫除米勒电容的电荷, 因此栅极的电压基本维持不变。 $V_{ds}$  电压降低到很低的值后, 米勒电容的电荷基本上被扫除, 即图 3 中的 C 点, 于是, 栅极的电压在驱动电流的充电下又开始升高, 见图 3 中的 C-D, 使 MOSFET 进一步完全导通。

C-D 为可变电阻区, 相应的  $V_{gs}$  电压对应着一定的  $V_{ds}$  电压。 $V_{gs}$  电压达到最大值,  $V_{ds}$  电压达到最小值, 由于  $I_d$  电流为  $I_D$  恒定, 因此  $V_{ds}$  的电压即为  $I_D$  和 MOSFET 的导通电阻的乘积。

### 3 结论

基于 MOSFET 的漏极导通特性曲线可以直观的理解 MOSFET 开通时, 跨越关断区、恒流区和可变电阻区的过程。米勒平台即为恒流区, MOSFET 工作于放大状态,  $I_d$  电流为  $V_{gs}$  电压和跨导乘积。