



应用笔记 Application Note

氮化镓产品应用系列

# GaN 晶体管的特性



## 目 录

1 简介 .....	3
2 GaN 晶体管的工作模式 .....	3
2.1 正向截止 ( $V_{GS}=0$ ) .....	3
2.1.1 $V_{GS}=0, 0 < V_{DS} < -V_{t-GaN}$ .....	3
2.1.2 $V_{GS}=0, 0 < -V_{t-GaN} < V_{DS}$ .....	4
2.2 正向导通 ( $V_{GS} > V_{t-Si}, V_{DS} > 0$ ) .....	4
2.3 反向导通 ( $V_{DS} < 0$ ) .....	4
2.3.1 反向导通1: $V_{DS} < 0, V_{GS} = 0$ .....	4
2.3.2 反向导通2: $V_{DS} < 0, V_{GS} > V_{t-Si}$ .....	5
2.3.3 反向关断 (反向恢复行为) .....	5

## 1 简介

润新氮化镓功率晶体管由一个常闭低压 Si MOS 晶体管和一个常通高压 GaN HEMT 晶体管级联构成，如图1所示。

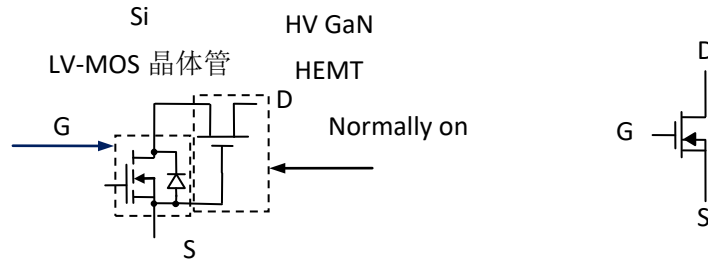


图1 Cascode GaN 原理图

被封装在此结构中的 Si LV-MOS 晶体管和 GaN HEMT 组成一个独立的 GaN 功率晶体管。GaN 晶体管的 Gate 和 Source 分别是 Si MOS 晶体管的 Gate 和 Source，而 GaN 晶体管的 Drain 是 GaN HEMT 的 Drain。

在应用中，GaN 晶体管行为类似具有低恢复电荷体二极管的超快晶体管。体二极管是 MOS 晶体管内在的 p-n 结，且与 MOS 晶体管沟道并联。当 MOS 晶体管关闭时，体二极管可从 Source 极到 Drain 流过电流，类似实际应用中的续流管。

然而，体二极管在导通时储存少数载流子。在导通期间，在高压 MOS 晶体管中会存储大量少数载流子，导致 MOS 晶体的反向恢复性能变差，比如反向恢复电流边大且反向恢复时间变长。相较而言，润新 GaN 功率晶体管由一个高压 GaN HEMT 晶体管和一个在续流期间只储存少许少数载流子的 LV MOS 晶体管组成，因此润新 GaN 晶体管展现出低反向恢复电荷和反向恢复时间短的巨大性能优势。

总体来讲，润新 GaN 晶体管开关速度极快，导通和关断时间小于10ns；同时，反向恢复电荷小、反向恢复时间短，在第三象限工作时损耗也非常小。因此，润新 GaN 晶体管在高频应用中的优势非常明显。

## 2 GaN 晶体管的工作模式

为了更好的理解 GaN 功率晶体管的工作，将工作区分如下3种模式：（1）正向截止，（2）正向导通，（3）反向导通。3种模式如图2、3、4所示，图中  $V_{t-Si}$  表示 LV Si MOS 晶体管的阈值电压， $V_{t-GaN}$  表示 GaN HEMT 的阈值电压（ $V_{t-GaN} < 0$ ）， $V_{DS}$  表示栅源电压， $I_D$  表示漏极电流，并且  $V_{GS-GaN} + V_{DS-Si} = 0$ 。

### 2.1 正向截止（ $V_{GS}=0$ ）

#### 2.1.1 $V_{GS}=0$ ， $0 < V_{DS} < -V_{t-GaN}$

当  $V_{GS}=0$  时，Si MOS 晶体管截止，且 Si MOS 晶体管和 GaN HEMT 沟道中都没有电流流过。

因为  $V_{DS} < -V_{t-GaN}$ ，并且  $I_d \approx 0$ ，Si MOS 晶体管 Drain 电势等于 GaN 功率晶体管 Drain 的电势，即  $V_{DS-Si} = V_{DS}$ 。在此情况下，GaN 晶体管的 Drain 极电压全部落在 Si MOS 晶体管上。

### 2.1.2 $V_{GS}=0, 0 < -V_{t-GaN} < V_{DS}$

当  $V_{DS}$  增加，GaN HEMT 的 Gate 相对于 Source 的电压会变得更负，GaN HEMT 逐渐截止。当  $V_{DS} = -V_{t-GaN}$  时，GaN HEMT 完全截止，GaN HEMT 的压降为  $V_{DS} + V_{t-GaN}$ ， $V_{t-GaN} < 0$ 。

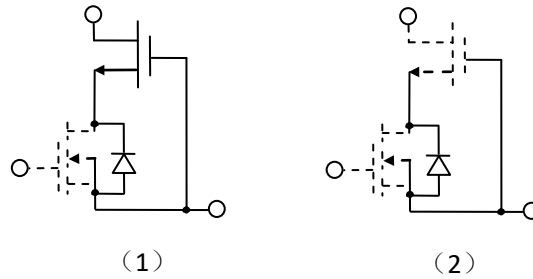


图2 (1) 正向截止1:  $V_{GS}=0, 0 < V_{DS} < -V_{t-GaN}$ , (2) 正向截止2:  $V_{GS}=0, 0 < -V_{t-GaN} < V_{DS}$ 。

## 2.2 正向导通 ( $V_{GS} > V_{t-Si}, V_{DS} > 0$ )

当 Si MOS 晶体管导通 ( $V_{GS} > V_{t-Si}$ )，GaN 晶体管进入线性区， $V_{DS}$  为：

$$V_{DS} = I_D (R_{DS(on)-Si} + R_{DS(on)-GaN}),$$

$R_{DS(on)-Si}$  和  $R_{DS(on)-GaN}$  分别是 Si MOS 晶体管和 GaN HEMT 的导通电阻。

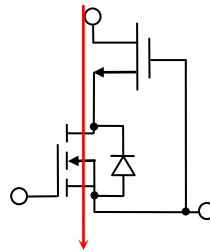


图3 正向导通  $V_{GS} > V_{t-Si}$

## 2.3 反向导通 ( $V_{DS} < 0$ )

### 2.3.1 反向导通1: $V_{DS} < 0, V_{GS} = 0$

当 GaN 晶体管截止 (LV Si MOS 晶体管截止) 并且 GaN 晶体管 Drain 与 Source 之间有反向电压，LV Si MOS 晶体管的体二极管和 HV GaN HEMT 沟道之间会有电流流过。GaN 晶体管的反向电压降  $V_{SD}$  是 Si MOS 晶体管体二极管压降  $V_{DS-Si}$  与 GaN 沟道压降之和。

$$V_{SD} = V_{SD-Si} + I_F * R_{DS(on)-GaN}$$

**2.3.2反向导通2:  $V_{DS} < 0, V_{GS} > V_{t-Si}$**

如上式所示，GaN 晶体管的反向压降是一个电流方程，且高于 Si MOS 晶体管体二极管压降。然而在实际应用中，为了提高性能可以在反向导通期间使低压 Si 导通，减少反向导通压降。这种方法经常是在一个小的死区时间之后使用。

当 Gate 电压高于 GaN 晶体管的  $V_{t-Si}$ ，低压 Si MOS 晶体管导通并且反向电流  $I_F$  流过 Si 沟道和 Ga-N 沟道。通常情况下， $I_F * R_{DS(on)-Si} < V_{SD-Si}$ ，且 GaN 晶体管的反向压降为：

$$V_{DS} = I_F (R_{DS(on)-Si} + R_{DS(on)-GaN})$$

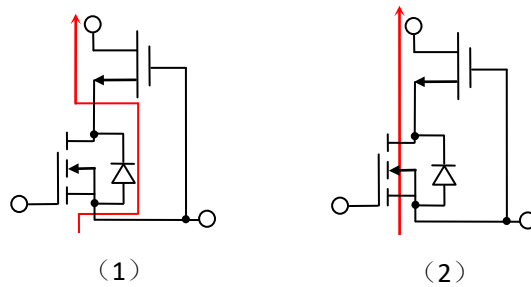


图4 (1) 反向导通1:  $V_{DS} < 0, V_{GS} = 0$ , (2) 反向导通2:  $V_{DS} < 0, V_{GS} > V_{t-Si}$ 。

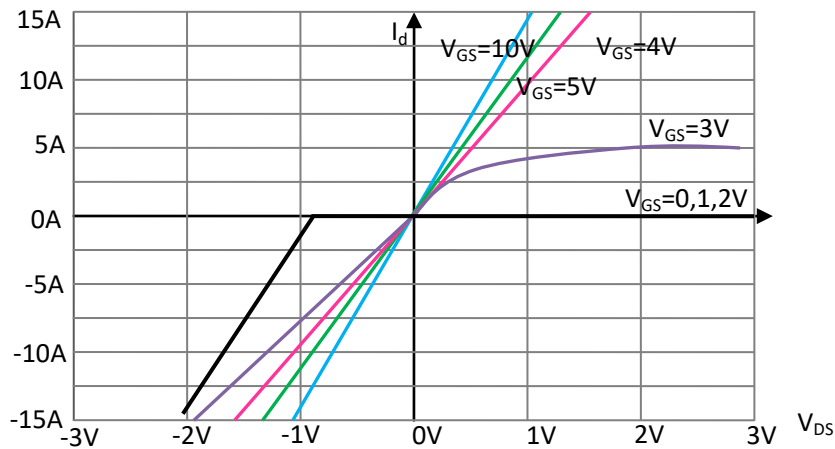


图5 Cascode 结构 GaN 功率晶体管 I-V 曲线

**2.3.3 反向关断 (反向恢复行为)**

可以通过反向恢复测试验证 GaN 功率晶体管比高压 MOS 晶体管的反向恢复损耗更低。

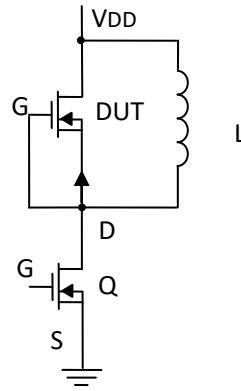


图6 反向恢复测试原理图

如图6所示的反向恢复测试电路原理图，测试电路由被测晶体管（DUT）、电感 L 和控制晶体管 Q 组成。测试开始，Q 先导通，Q 和 L 中的电流线性增减，反向恢复电流  $I_F=0$ 。然后，Q 截止，电流通过 L 和 DUT 续流， $I_F \neq 0$ 。通过改变 Q 的导通时间改变从电感流经 DUT 源极流到 DUT 漏极的反向电流  $I_F$ 。为了观察 DUT 在反向电流  $I_F$  下的反向恢复关闭 Q，DUT 从反向导通状态转换为正向截止。

### 总结：

氮化镓功率晶体管有正向截止、正向导通和反向导通三个工作模式。相较于 Si MOSFET，氮化镓功率晶体管开关速度非常快且具有优良的反向恢复特性。由于具有这些特性，GaN 功率晶体管特别适合硬开关无二极管桥式的应用，例如电机驱动变频器，光伏逆变器，图腾柱功率因数校正电路等相关应用。