

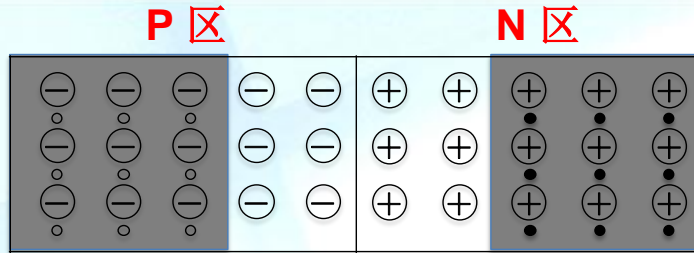
MOSFET体二极管反向恢复过程

Aug. 14 2013

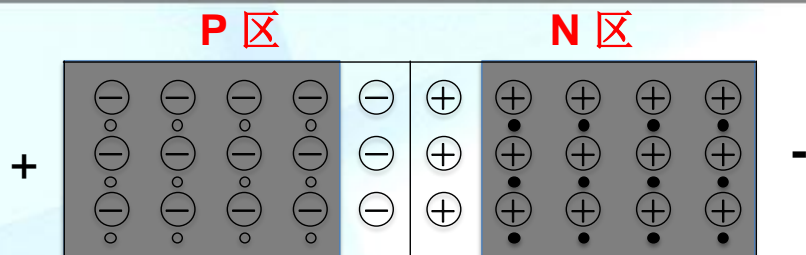


AOS: Powering a Greener Future™

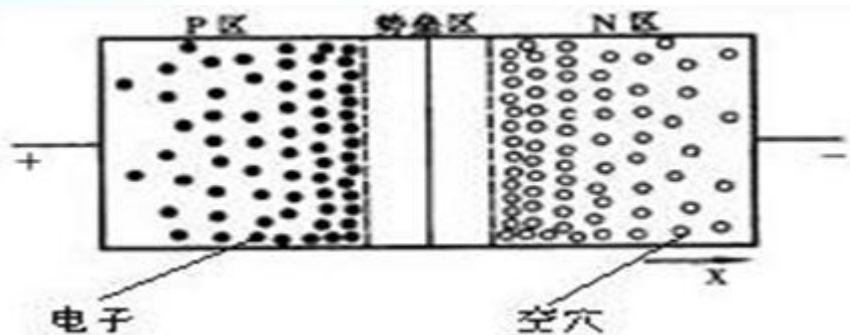
- PN结反向恢复过程
- MOSFET体二极管的形成
- MOSFET体二极管的反向恢复过程
 - di/dt 阶段
 - dv/dt 阶段
- MOSFET体二极管反向恢复的仿真和实测结果
 - 不同寄生电感
 - 不同 C_{GS} 的影响
 - 不同 I_F 的影响
- 结论



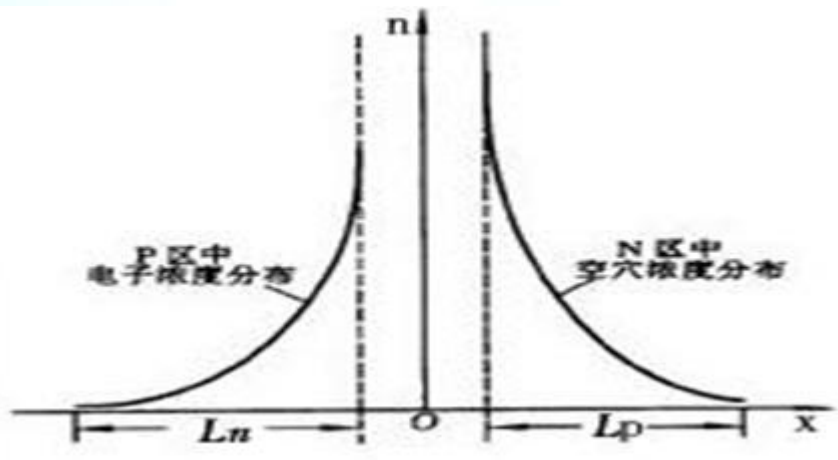
- 扩散运动和漂移运动达到平衡，PN结形成一势垒区
 - 扩散：P区空穴向N区扩散，N区电子向P区扩散
 - 漂移：由于势垒区的存在，N区扩散至P区的部分电子被拉回，P区扩散至N区的部分空穴被拉回



(a) 势垒区图



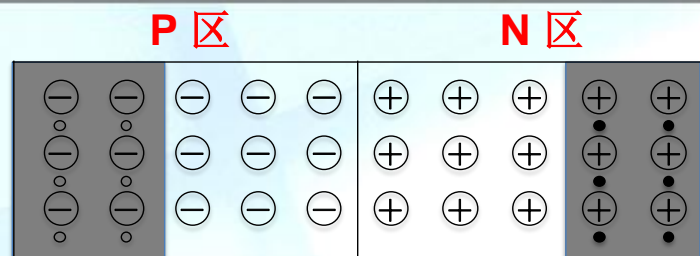
(b) 非平衡少数载流子分部图



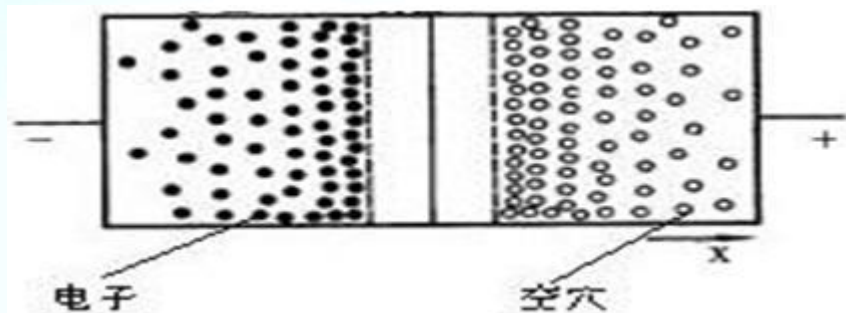
(c) 非平衡少数载流子浓度分布图

- 外加正向电压削弱了PN结的内电场，漂移运动被削弱，扩散运动被增强，扩散和漂移的动态平衡被破坏。
- P区的空穴（多子）流向N区，N区的电子（多子）流向P区。进入P区的电子和进入N区的空穴分别成为该区的少数载流子。因此，在P区和N区的少数载流子比无外加电压时多。这些多出来的少数载流子称为非平衡少数载流子，如图(b)所示。
- 非平衡少数载流子依靠积累时浓度差在N区和P区进行扩散。在扩散过程中，同该区内多数载流子相遇而复合，距离PN结边界越远，复合就越多，这样就形成了如图(c)所示的非平衡少数载流子浓度分布规律。
- 正向导通时，非平衡少数载流子积累的现象叫做电荷存储效应。

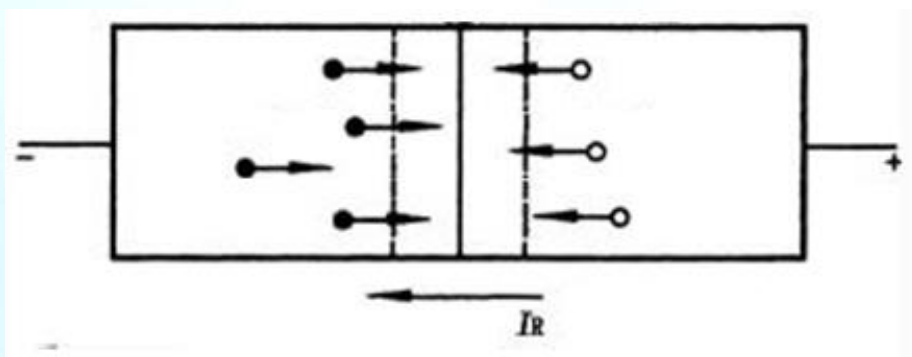
反向恢复



(a) 势垒区图

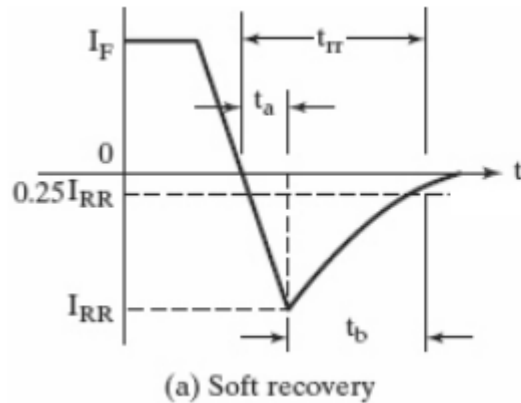


(b) 非平衡少数载流子分布图



(c) 非平衡少数载流子被拉回

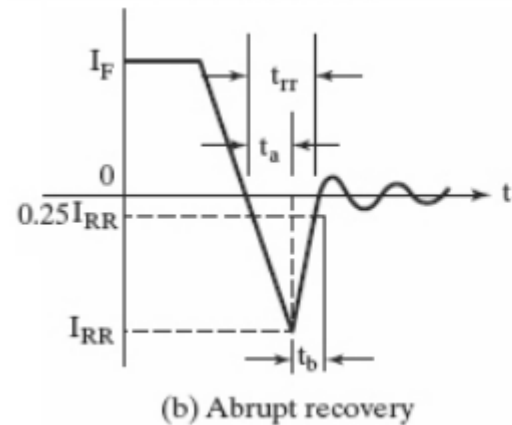
- 施加反向电压时，P区存储的电子和N区存储的空穴不会马上消失，但它们将通过两个途径逐渐减少：
 - 在反向电场作用下，P区电子被拉回N区，N区空穴被拉回P区，形成反向漂移电流 I_R ；
 - 与多数载流子复合。
- 在这些存储电荷突然消失之前，PN结仍处于正向偏置，即势垒区仍然很窄，PN结的电阻很小，与 R_L 相比可以忽略，所以此时反向电流 $I_R = (V_R + V_D) / R_L$ 。 V_D 表示PN结两端的正向压降，一般 $V_R \gg V_D$ ，即 $I_R \approx V_R / R_L$ 。在这段期间， I_R 基本上保持不变，主要由 V_R 和 R_L 所决定。
- 经过时间 T_s 后，P区和N区所存储的电荷已显著减少，势垒区逐渐变宽，反向电流 I_R 逐渐减小到正常反向饱和电流的数值，经过时间 T_f ，二极管转为截止。



Reverse recovery time : $t_{rr} = t_a + t_b$

The peak reverse current : $I_{RR} = t_a \frac{di}{dt}$

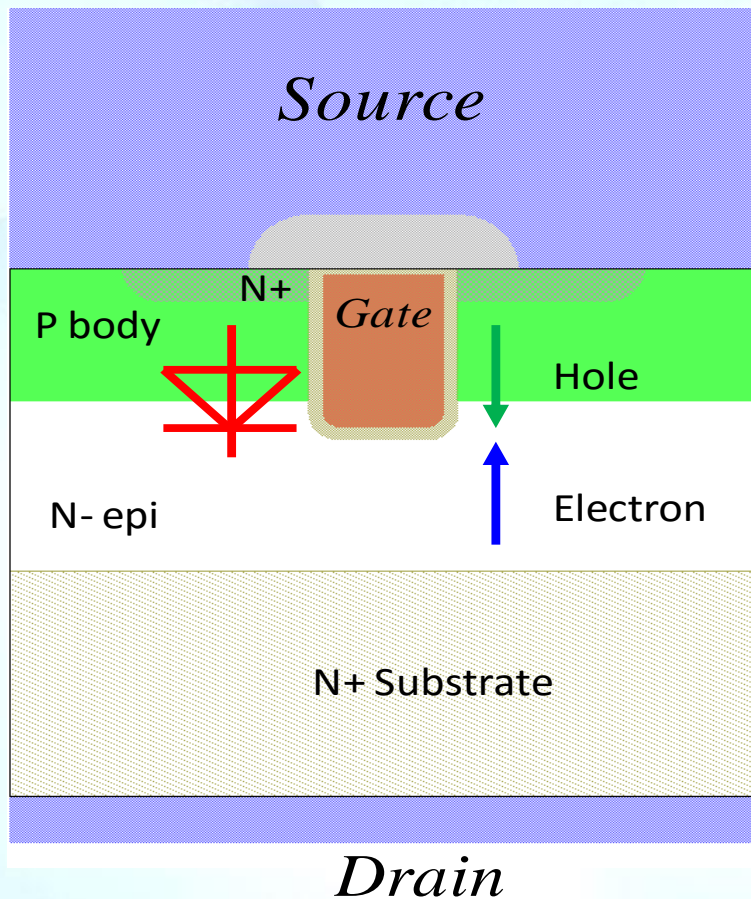
$$Q_{RR} \cong \frac{1}{2} I_{RR} t_a + \frac{1}{2} I_{RR} t_b = \frac{1}{2} I_{RR} t_{rr}$$



$$t_{rr} \cong \sqrt{\frac{2Q_{RR}}{di/dt}}$$

$$I_{RR} \cong \frac{2Q_{RR}}{t_{rr}} = \sqrt{2Q_{RR} \frac{di}{dt}}$$

- ❑ MOSFET体二极管Tb/Ta 一般为0.2~0.4
- ❑ 硬恢复特性的体二极管更易产生振铃

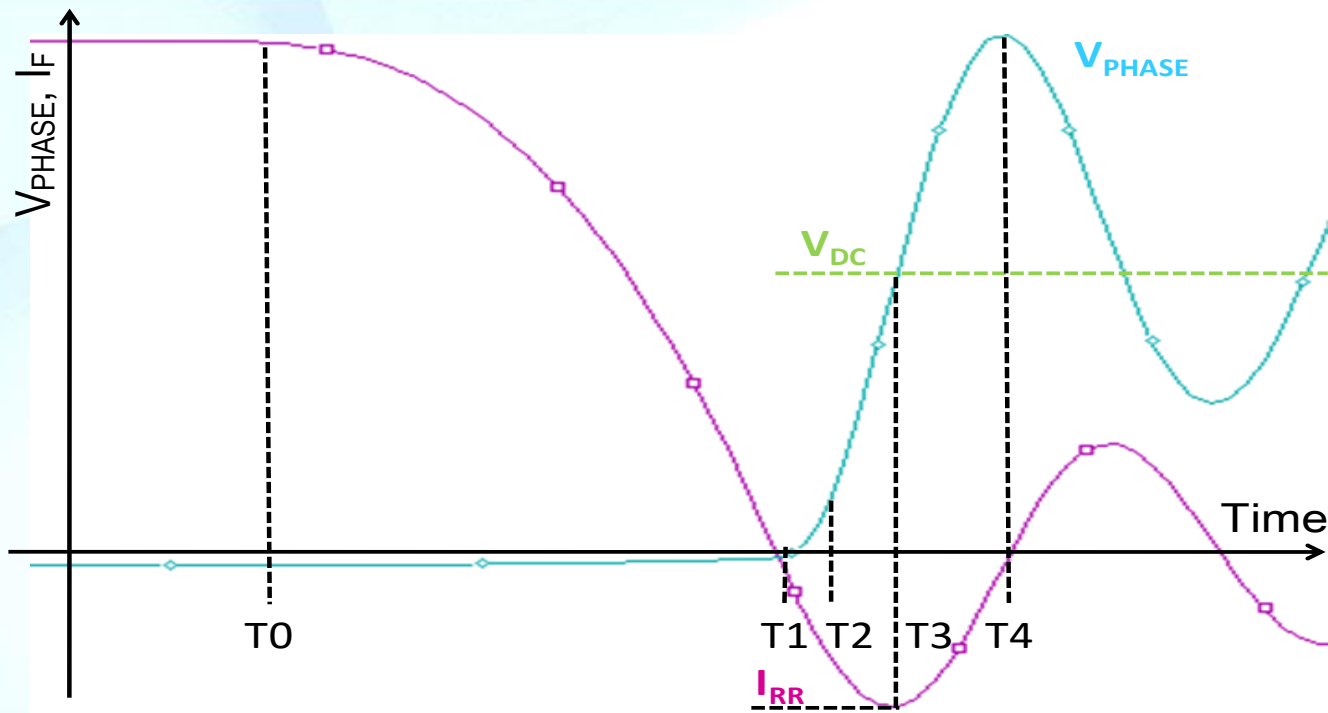


□ MOSFET结构

- 在N- epi外延层上扩散形成P基区，然后通过刻蚀技术形成深度超过P基区的沟槽，在沟槽壁上热氧化生成栅氧化层，再用多晶硅填充沟槽，利用自对准工艺形成N+源区，背面的N+ substrate为漏区，在栅极加上一定正电压后，沟槽壁侧的P基区反型，形成垂直沟道。

- P基区和N- epi形成了一个PN结，即MOSFET的寄生体二极管。

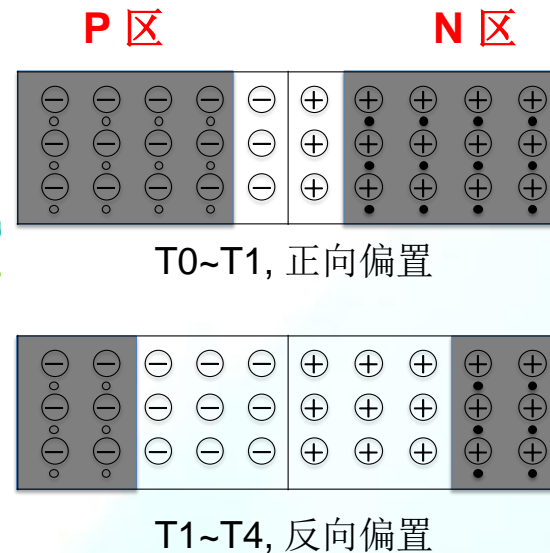
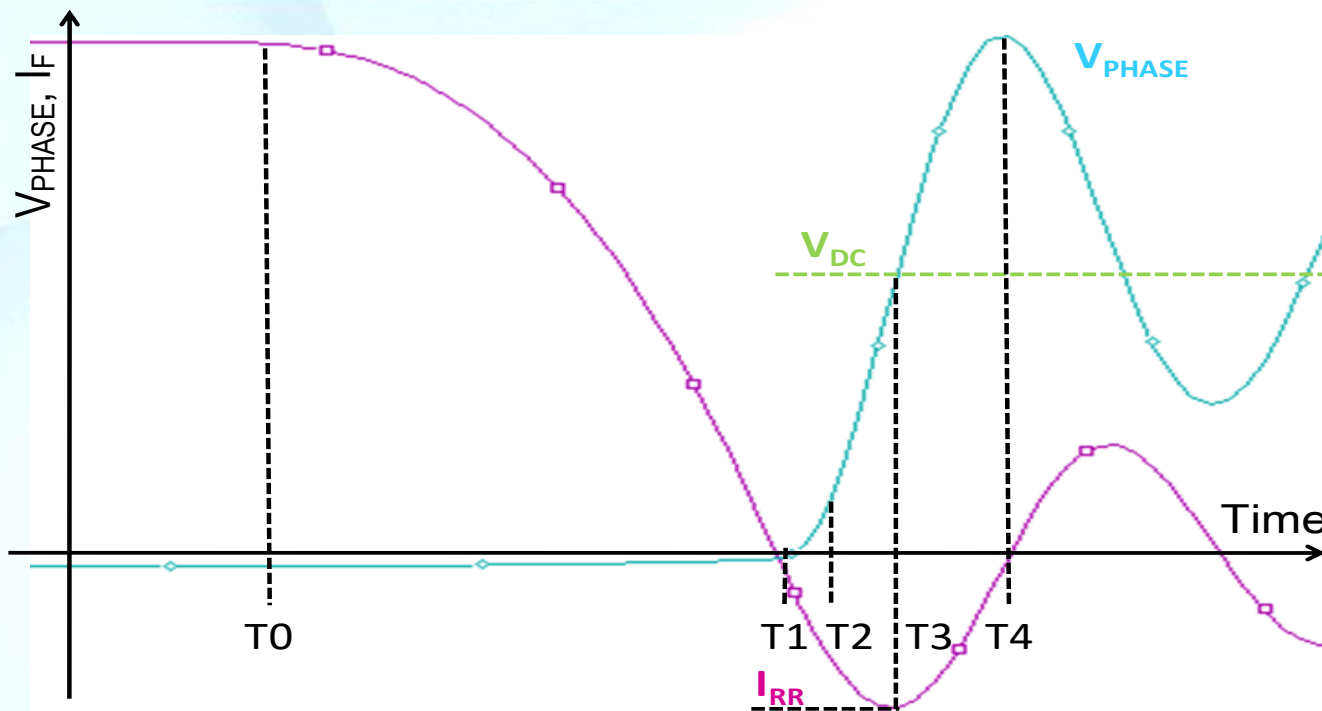
反向恢复- di/dt 阶段



□ T0~T2: di/dt 阶段

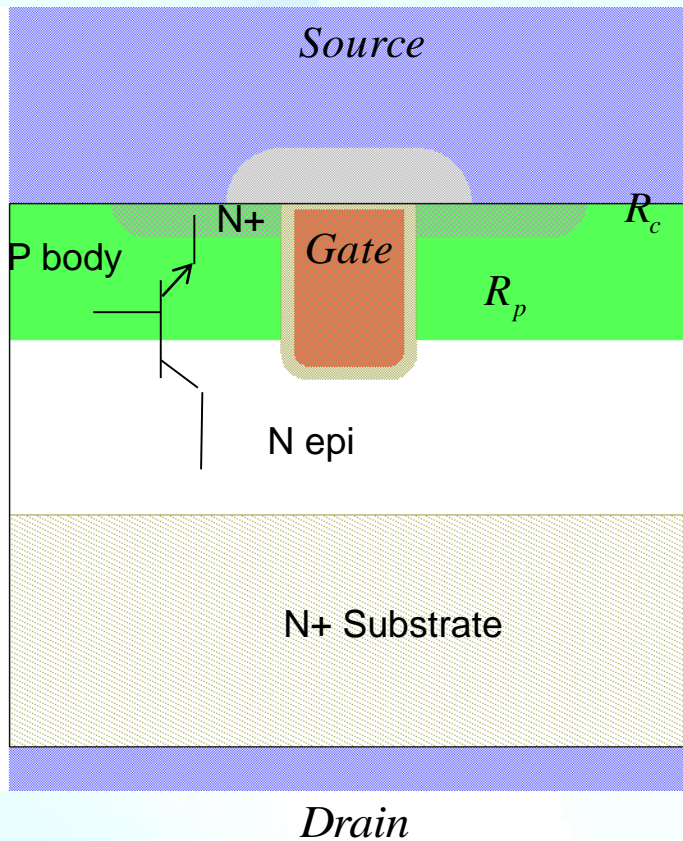
- T0~T1, PN结处于正向偏置, 即势垒区仍然很窄, PN结的电阻很小, 二极管的正向电流以一固定的 di/dt 逐渐减小, di/dt 的大小由外电路决定;
- T1~T2, 二极管的存储电荷在反向电压的作用下开始扫出, 但PN结仍未形成耗尽层, 反向电流由扫出的过量电荷维持。因此二极管不能承受反向电压, 电流仍以 di/dt 速率下降;

反向恢复- dv/dt 阶段



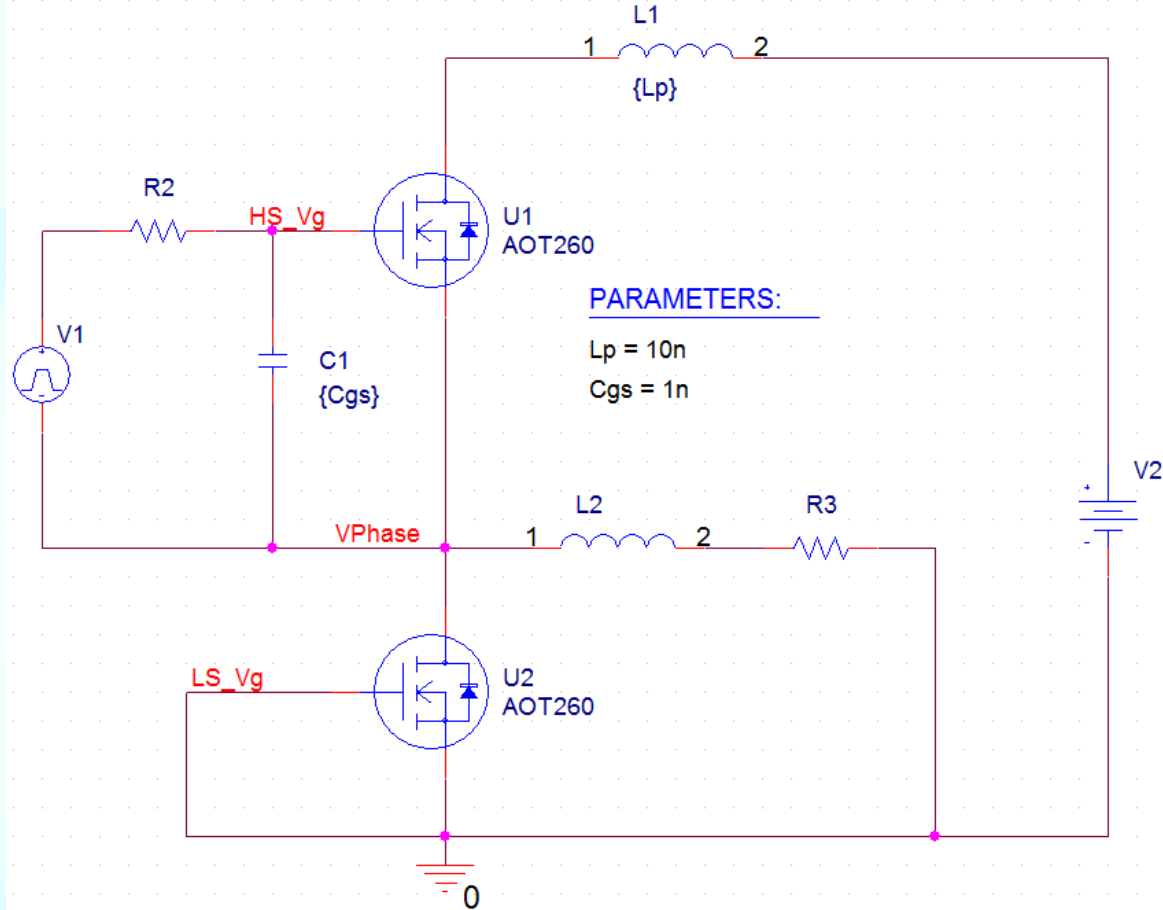
□ T2~T4: dv/dt 阶段

- T2~T3阶段，PN结处等离子浓度衰减为0，即在PN结处形成耗尽层，PN结开始承受反向电压。由于二极管反向电压的上升，导致了反向恢复电流的 di/dt 逐渐减小；在T3时刻，二极管电压达到 V_{DC} ， di/dt 降到0，扫出电流达到最大值，即 I_{RR} ；
- T3~T4阶段，反向电流由从等离子区扩散到耗尽层的载流子维持，由于等离子体的持续耗散，在空间电荷区的边缘过量电荷浓度的梯度逐渐减小，导致T3后的反向电流将减小。由于负 di/dt 的存在，二极管上的反向电压将会出现超调，当电流降为0时，反向电压将会达到最大值。T4之后，回路进入了RLC自由振荡阶段。



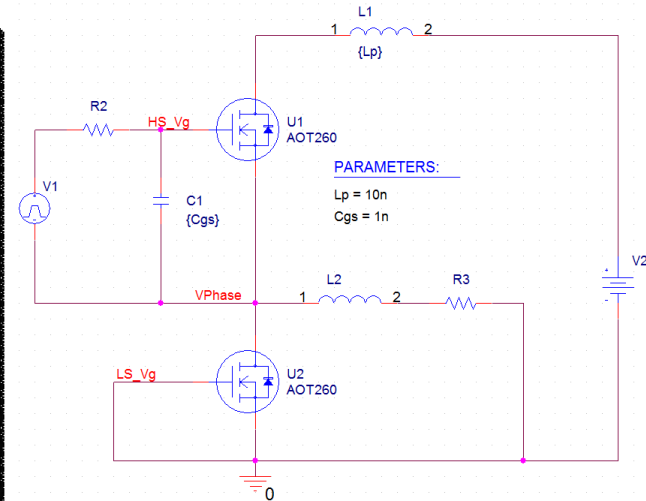
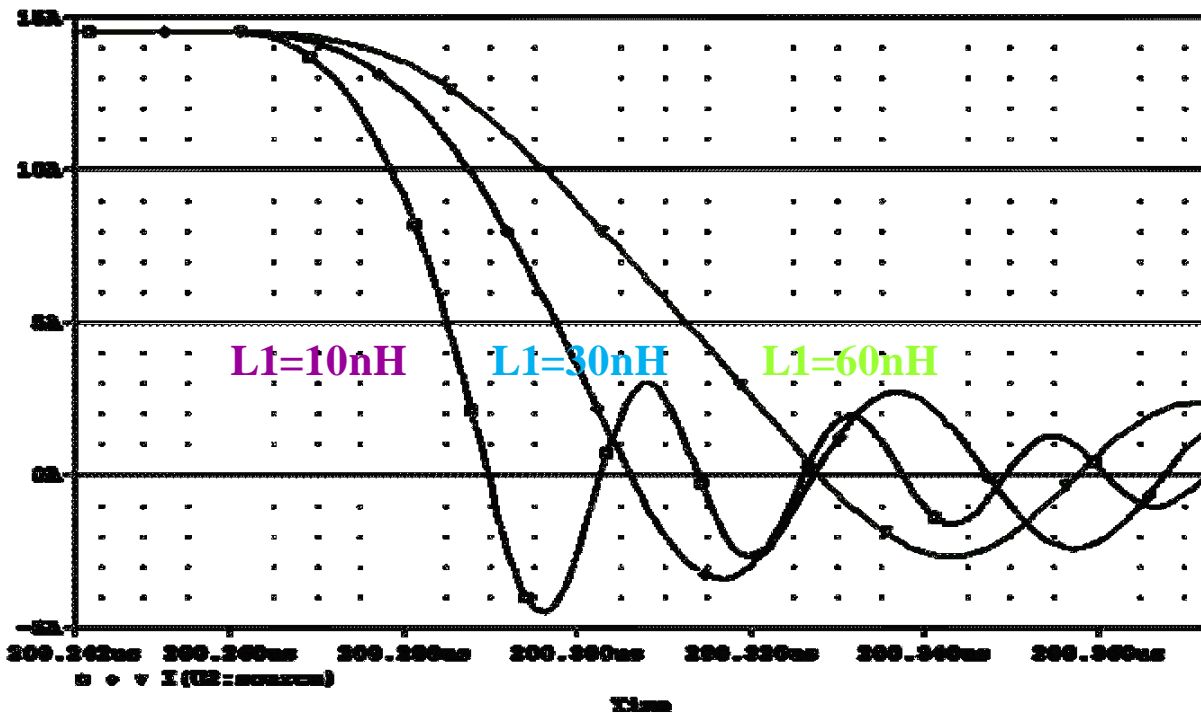
- 反向恢复dv/dt速度过快有可能触发寄生BJT导通
 - 高dv/dt会导致P body区域的少数载流子的电流密度过高，从而在BJT的基极建立起足够的电压使BJT导通，这也是为什么在datasheet中会有体二极管反向恢复dv/dt限制的原因

反向恢复仿真电路



- ❑ U2 - 被测器件
- ❑ U1 - 开关管，为电感提供电流以及为U2提供反向电压
- ❑ L1 - 线路的寄生电感
- ❑ L2 - 负载电感，用来提供正向电流 I_F

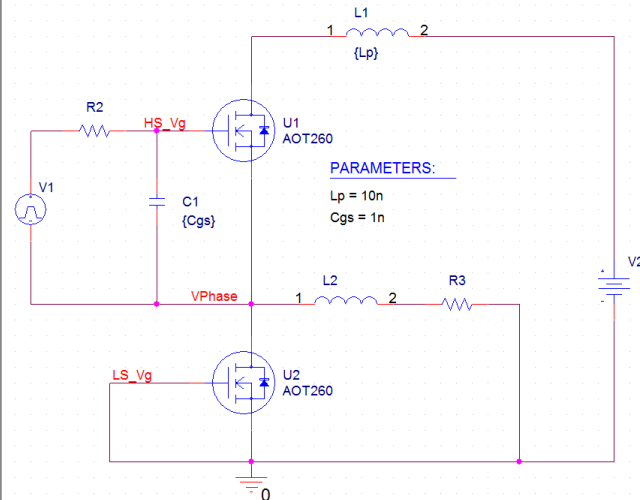
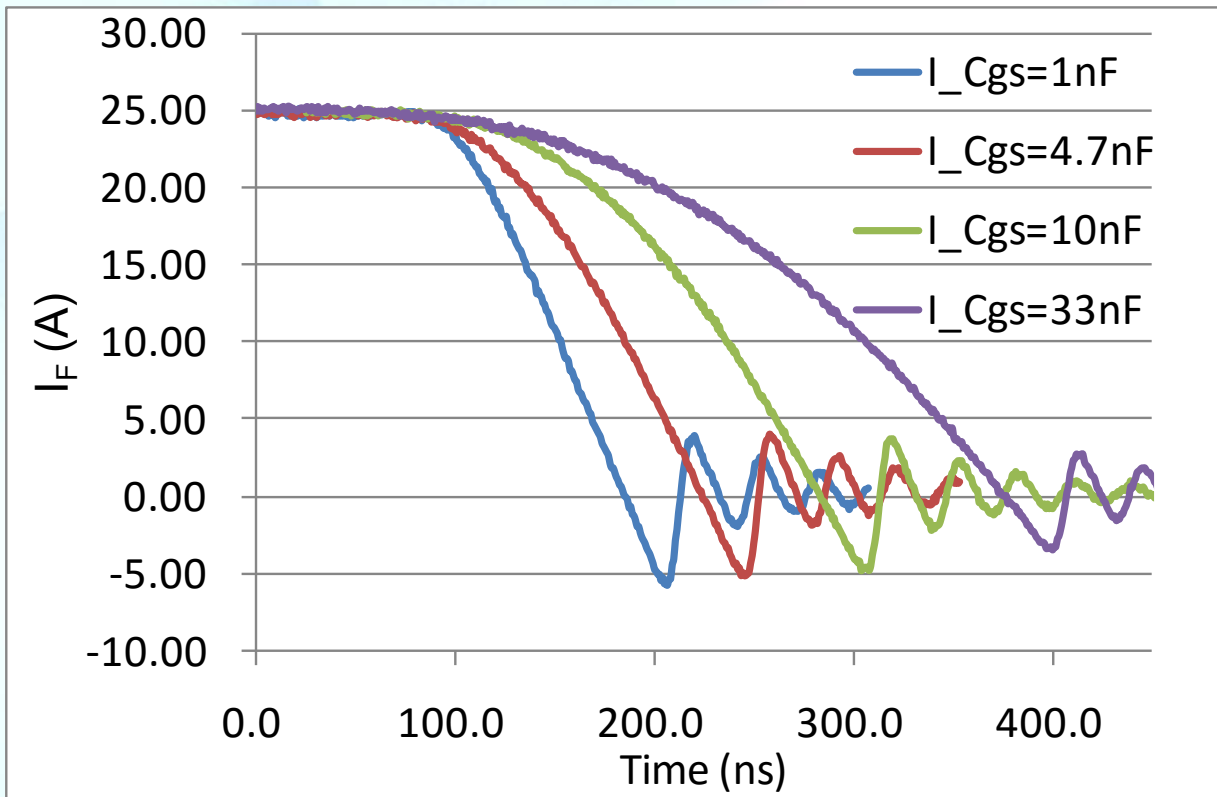
不同寄生电感仿真



- 电感值越小， di/dt 越大，反向恢复电流 I_{RR} 也越大。

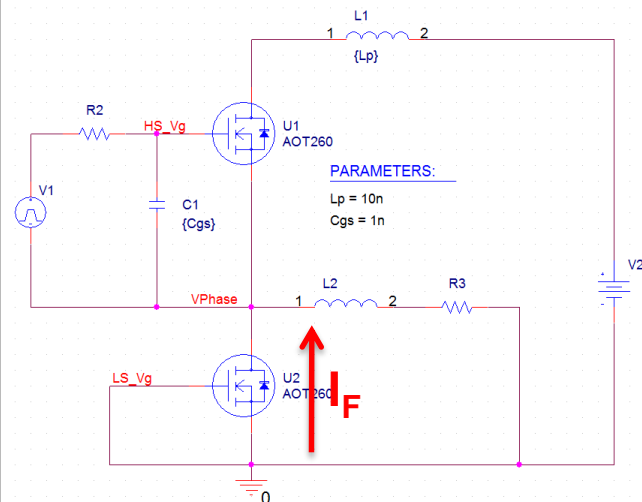
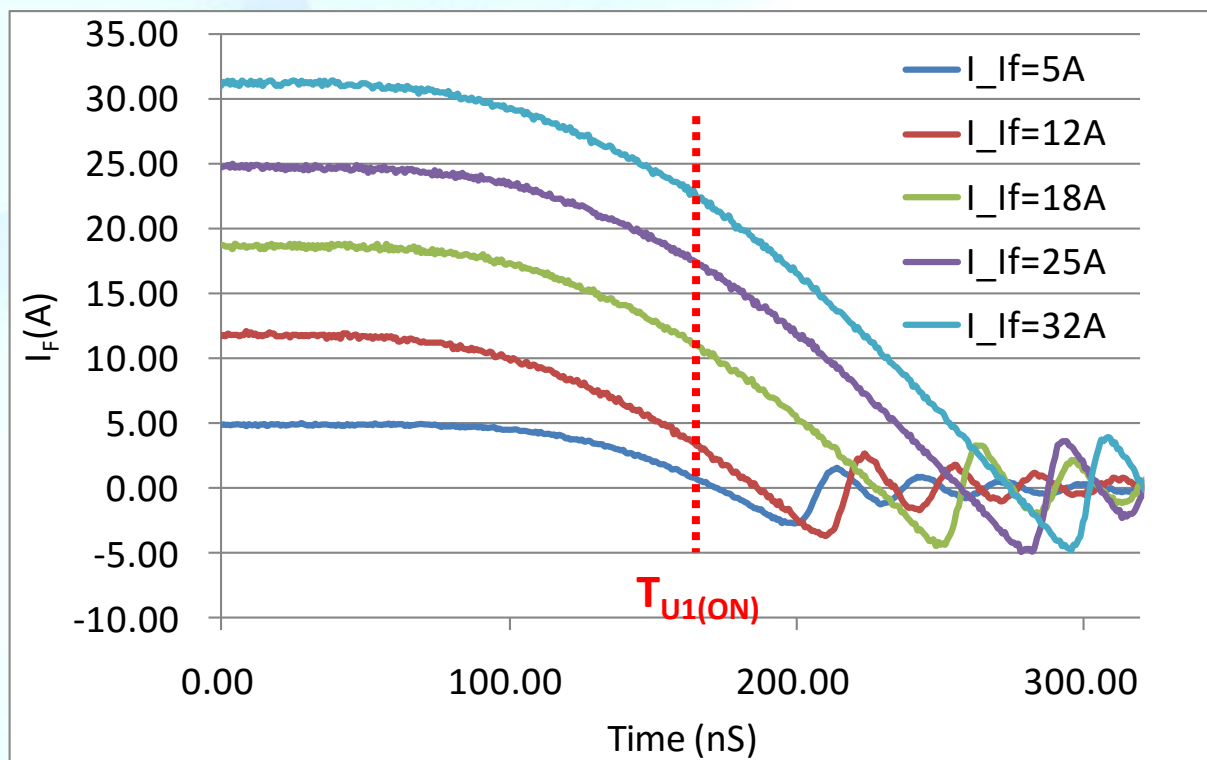
$$\frac{di}{dt} = \frac{V_{DC} - V_{DS}(U1)}{L1}$$

不同 C_{GS} 电容实际测试结果



- 控制U1的栅极电容C1来改变U1的开通速度同样也可以改变电流变化率 di/dt
 - U1的开关速度改变了 $V_{DS(U1)}$ 的变化率。
 - 随着 C_{GS} 的减小，U1的开通速度变快， di/dt 变大，反向恢复电流 I_{RR} 也会变大。
 - U1的开关速度对 di/dt 的影响是有限的，因为 $V_{DS(U1)}$ 对 di/dt 的影响仅仅是在U1的开通期间（即 di/dt 变化的初期），当U1完全开通后， di/dt 仅由回路的寄生电感L1决定。

不同 I_F 电流实际测试结果



通过改变U1的PWM脉冲的占空比来改变电感中的电流 I_F

- 当 I_F 大于18A时，其 di/dt 基本不变，反向恢复峰值电流 I_{RR} 也基本保持不变，这是因为，在 $T_{U1(ON)}$ 时刻后，U1已完全导通， $V_{DS(U1)}$ 不再变化，所以 di/dt 不变。
- 当 I_F 小于12A时，会发现其 di/dt 变小，反向恢复峰值电流 I_{RR} 也明显变小，这是因为在 $T_{U1(ON)}$ 时刻后，U1尚未完全导通， $V_{DS(U1)}$ 仍然较高，所以 di/dt 较小。

- 通过较好的布线减小线路的寄生电感，从而减小在反向恢复过程中的振铃；
- 通过控制合适的开关速度来控制反向恢复时的 di/dt ，减小反向恢复电流的峰值 I_{RR} ，从而减小振铃；
- 如果经过优化仍不能解决系统的振铃问题，则应通过选择具有较软恢复系数的MOSFET来进行设计。