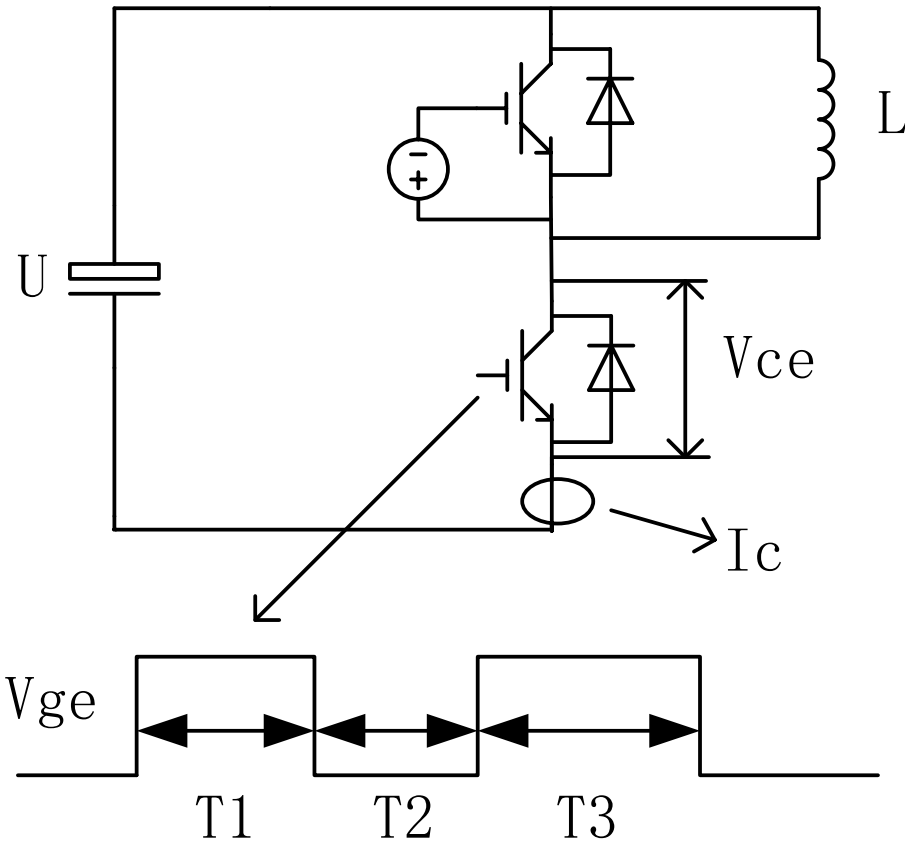


Technical Training



2012-4-06

Rev 04

IGBT双脉冲测试方法介绍

Winson Wei (魏炜)

CT-Concept Technologie AG - Switzerland

Wei.wei@igbt-driver.com

Mobile: 186-8878-5868

双脉冲测试方法的意义

1. 对比不同的**IGBT**的参数，例如同一个品牌的不同系列的产品的参数，或者是不同品牌的**IGBT**的性能。
2. 获取**IGBT**在开关过程的主要参数，以评估**R_{gon}**及**R_{goff}**的数值是否合适，评估是否需要配吸收电路等。
3. 考量**IGBT**在变换器中工作时的实际表现。例如二极管的反向恢复电流是否合适，关断时的电压尖峰是否合适，开关过程是否有不合适的震荡等。

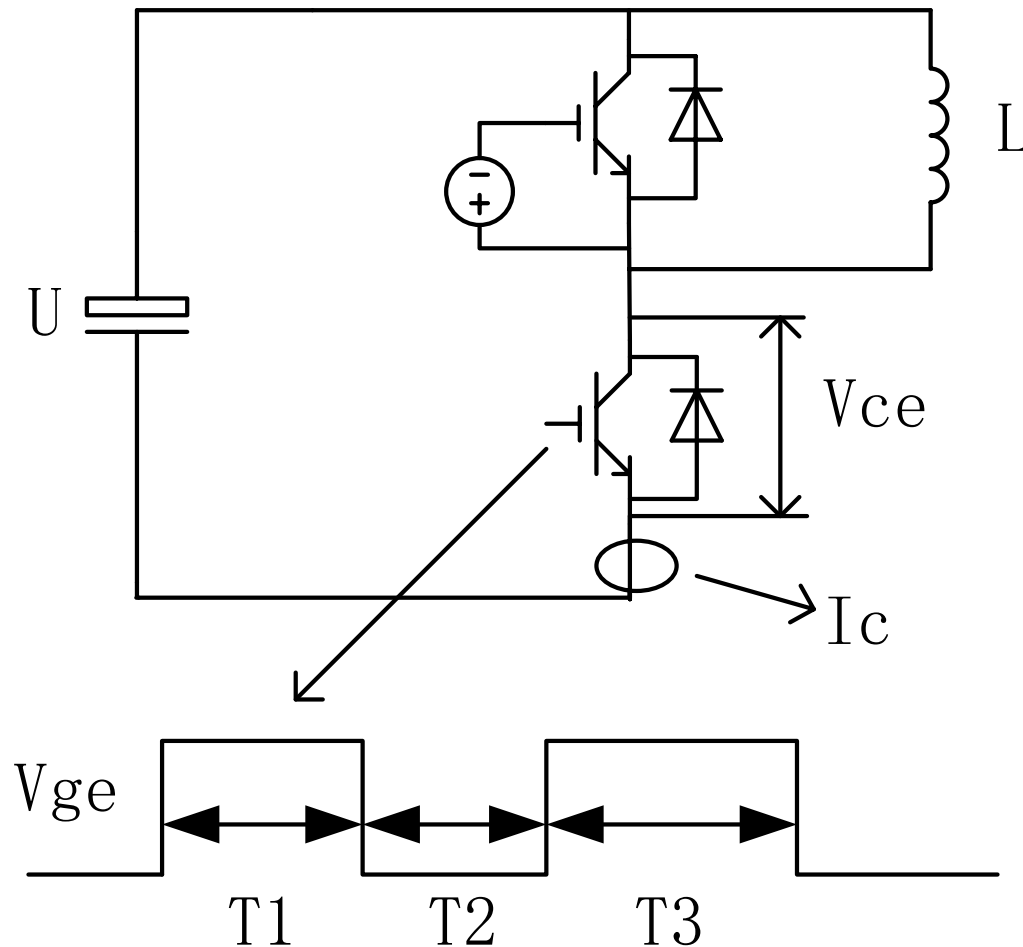
怎样认识IGBT的特性？

通常我们对某款**IGBT**的认识主要是通过阅读相应的**datasheet**，但实际上，数据手册中所描述的参数是基于一些已经给定的外部参数测试得来的，而实际应用中的外部参数都是个性化的，往往会有所不同，因此这些参数有些是不能直接拿来使用的。我们需要了解**IGBT**在具体应用中更真实的表现。

在**datasheet**中，描述**IGBT**的开关的行为的参数主要包括： t_{don} , t_r , t_{doff} , t_f , E_{on} , E_{off} , I_{SC} 等

要观测这些参数，最有效的方法就是：“双脉冲测试方法”。

双脉冲测试平台的电路

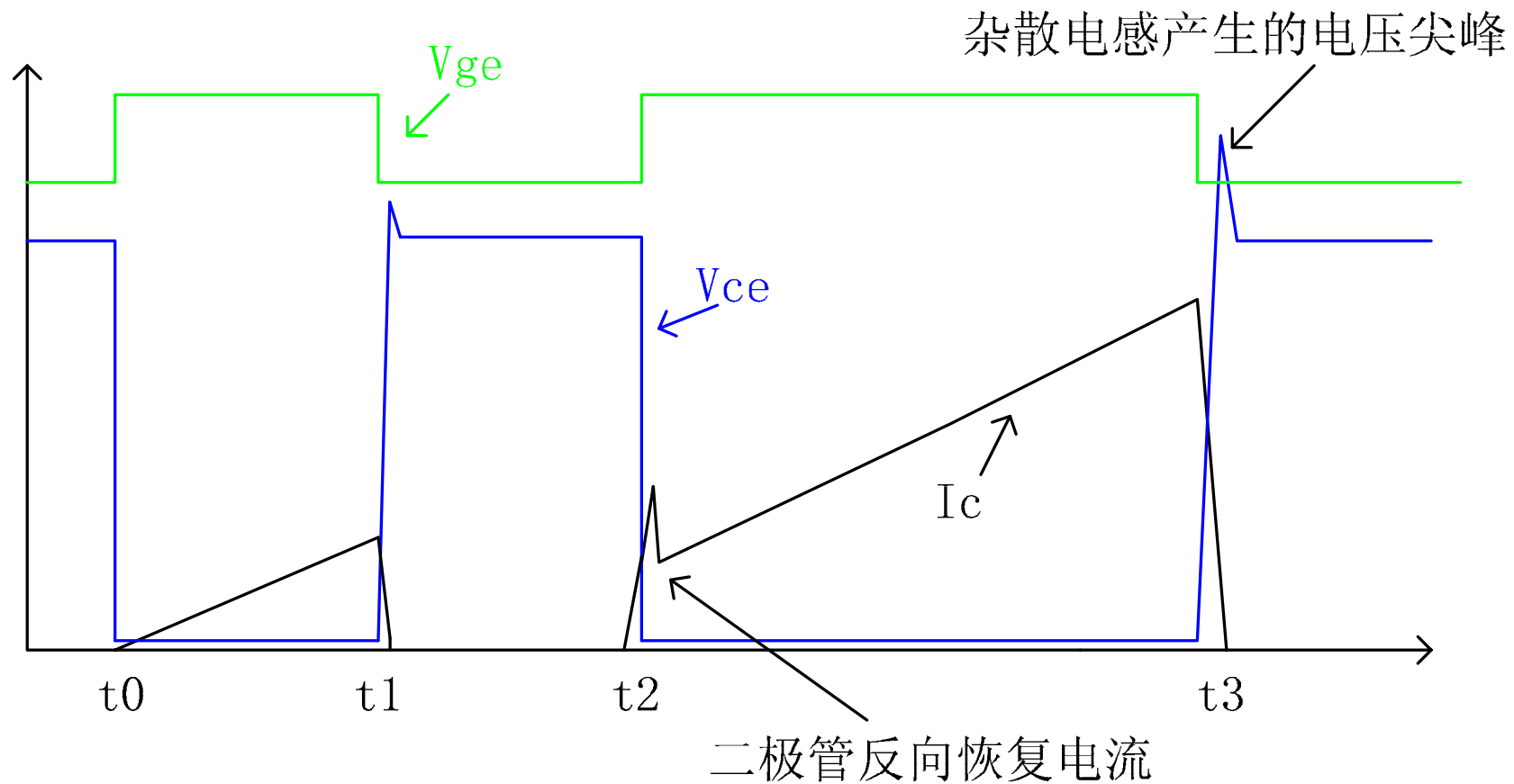


下管的IGBT及上管的二极管
是被测对象！

用高压隔离探头取 V_{ce} 电压；
用罗氏线圈电流探头取 I_c ；
用普通探头测量 V_{ge} 信号。

上管IGBT的门极上加了
负压，因此它是关断的，
只有续流二极管在起作用。
实际上也可以用单个二
极管代替这个IGBT。

双脉冲测试的基本实验波形

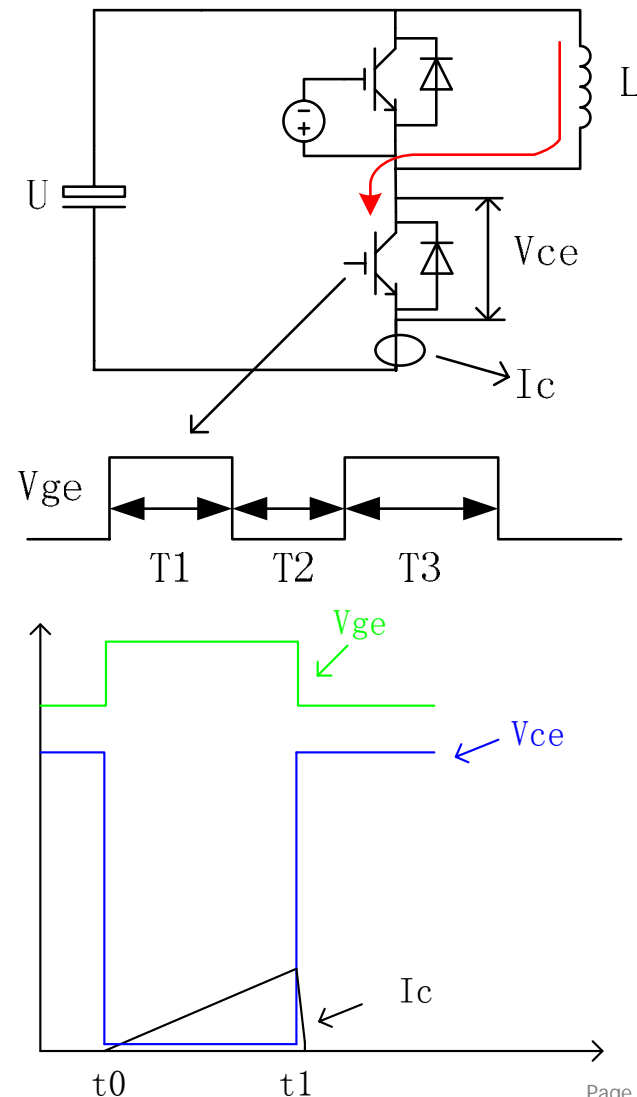


双脉冲实验的基本原理（1）

在 t_0 时刻，门极放出第一个脉冲，被测IGBT饱和导通，电动势 U 加在负载 L 上，电感的电流线性上升，电流表达式为：

$$I = \frac{U \cdot t}{L}$$

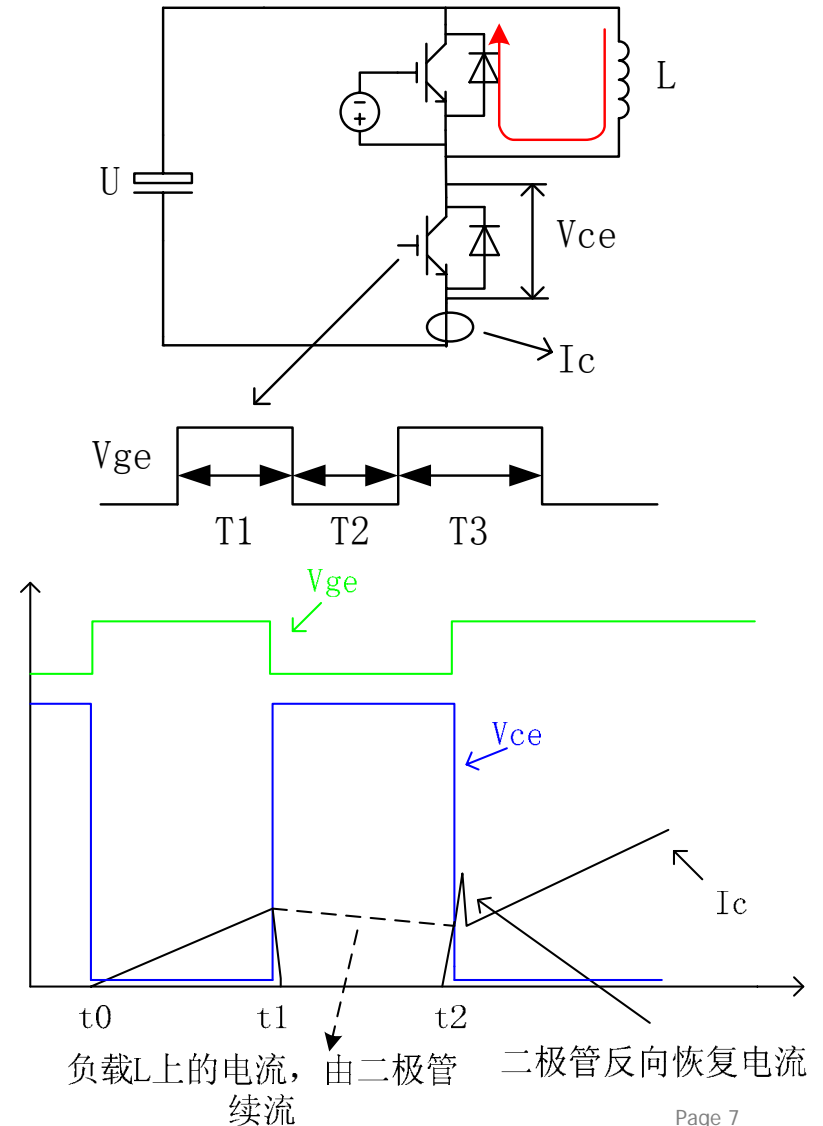
在 t_1 时刻，电感电流的数值由 U 和 L 决定，在 U 和 L 都确定时，电流的数值由 t_1 决定，时间越长，电流越大。因此可以自主设定电流的数值。



双脉冲实验的基本原理 (2)

在 t_1 时刻，被测IGBT关断，负载 L 的电流由上管二极管续流，该电流缓慢衰减，如图虚线所示。

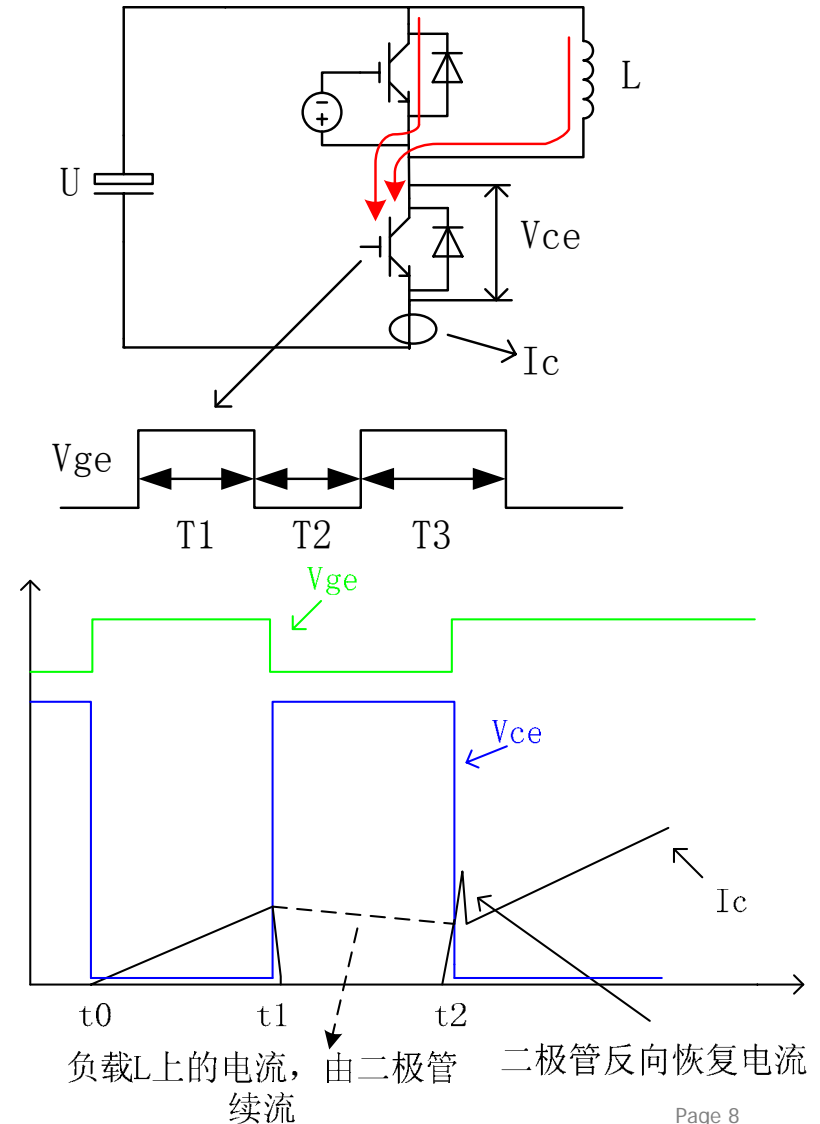
由于电流探头放在下管的发射极处，因此，在二极管续流时，IGBT关断，示波器上是看不见该电流的。



双脉冲实验的基本原理 (3)

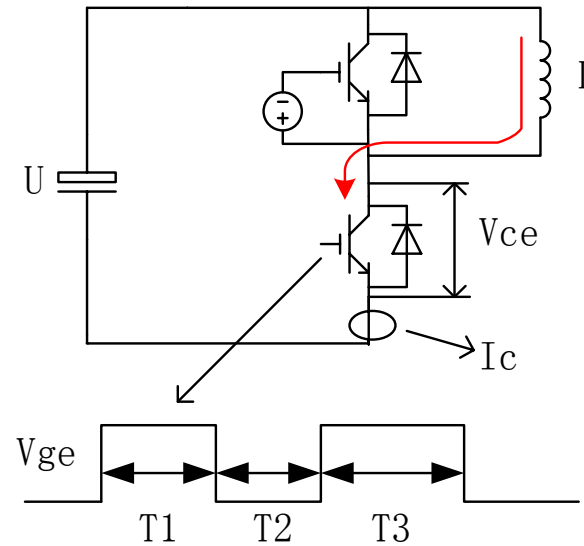
在 t_2 时刻，第二个脉冲的上升沿到达，被测IGBT再次导通，续流二极管进入反向恢复，反向恢复电流会穿过IGBT，在电流探头上能捕捉到这个电流，如图所示。

在 t_2 时刻，重点是观察IGBT的开通过程。反向恢复电流是重要的监控对象，该电流的形态直接影响到换流过程的许多重要指标。

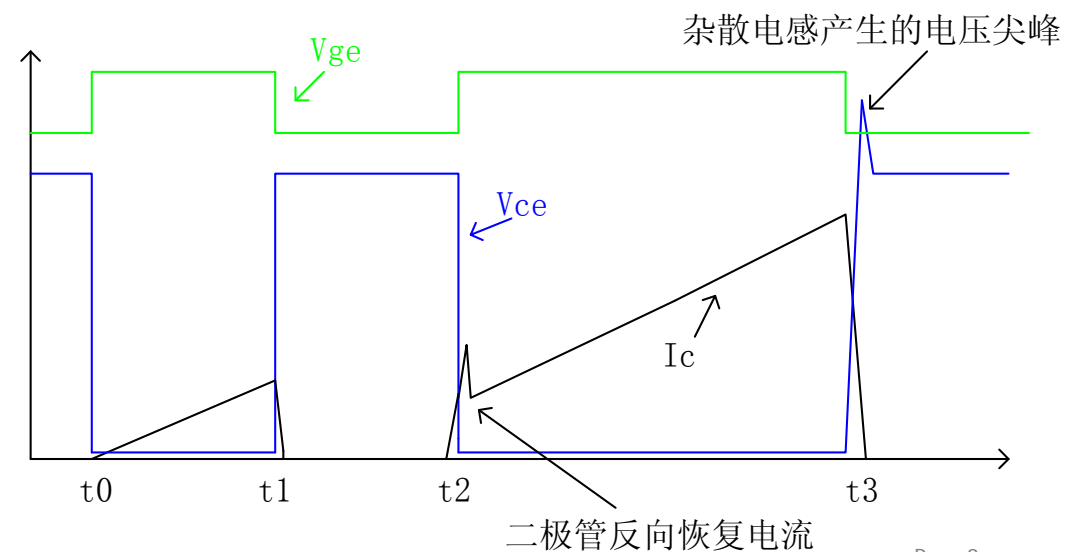


双脉冲实验的基本原理 (4)

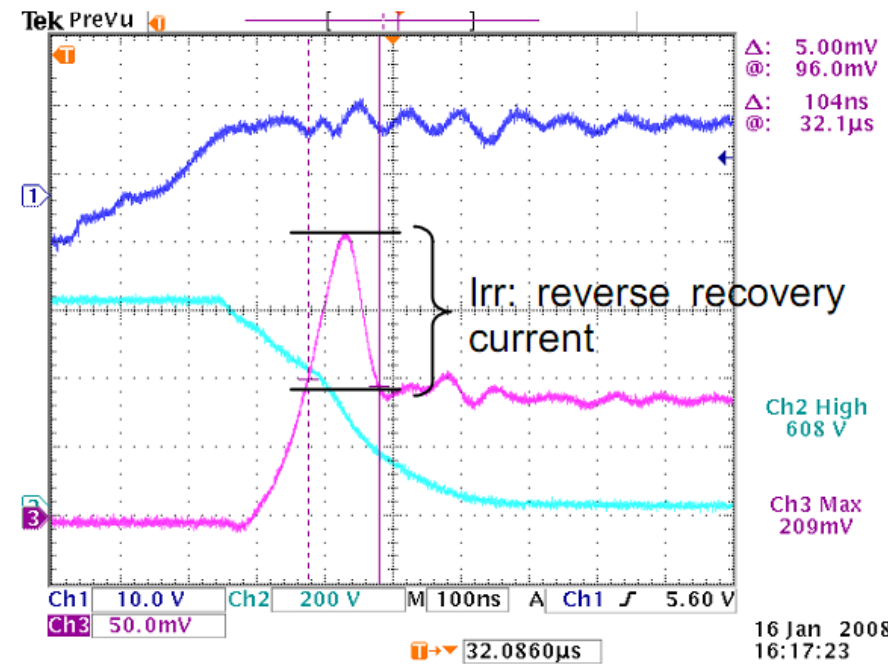
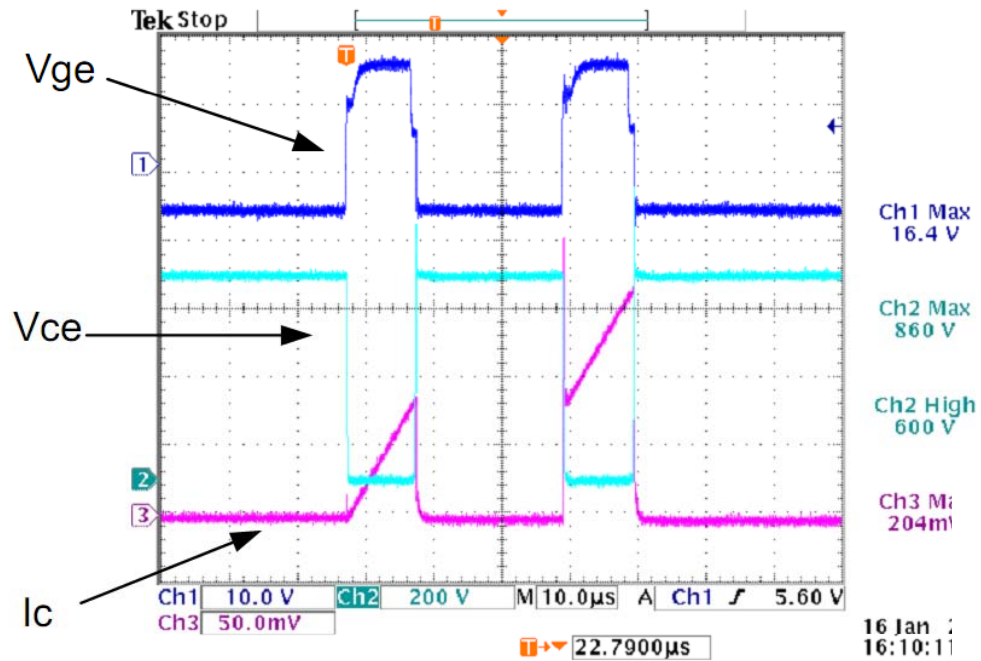
在 t_3 时刻，被测IGBT再次关断，此时电流较大，因为母线杂散电感的存在，会产生一定的电压尖峰，



在 t_3 时刻，重点是观察IGBT的关断过程。电压尖峰是重要的监控对象。



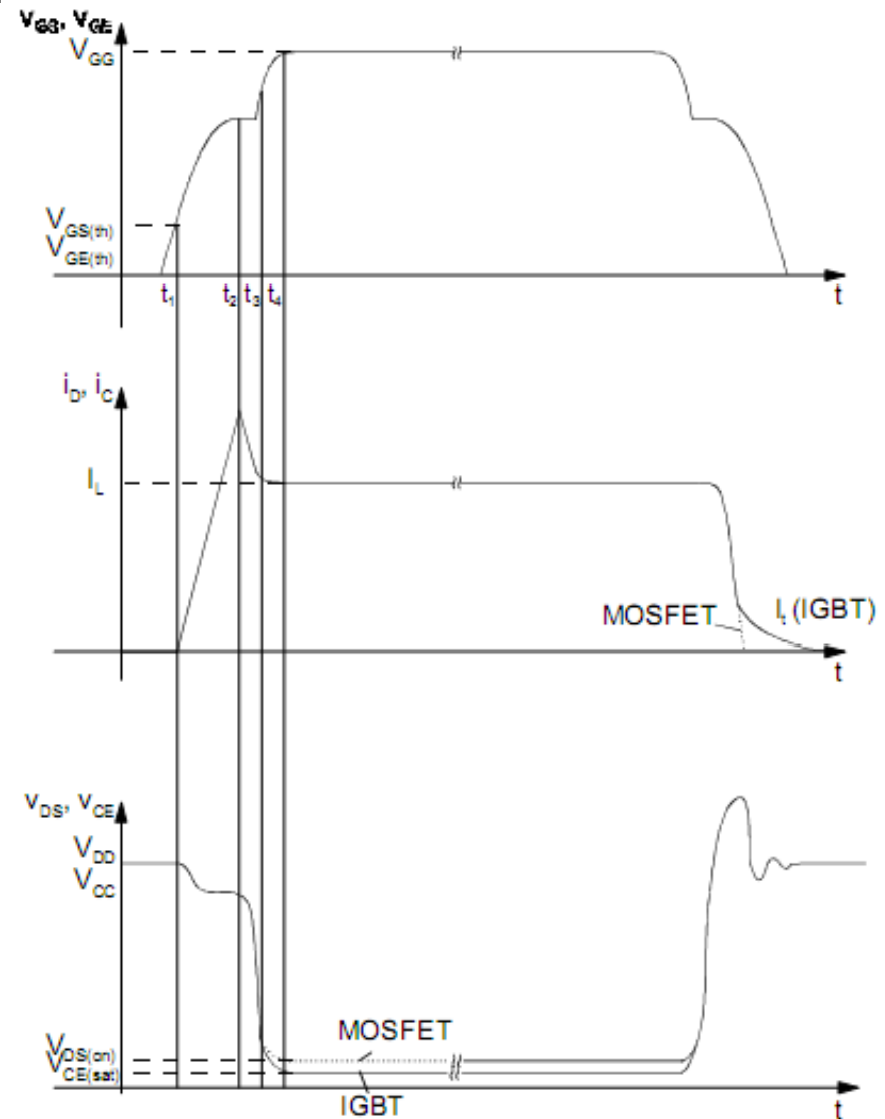
双脉冲实验的实测波形



双脉冲实验的关注点----开通过程

右图是IGBT典型的开通过程波形，当门极电压到达门槛值时，IGBT导通， I_c 开始增长，直到 I_c 基本到达电感电流的数值，续流二极管进入反向恢复后，IGBT的 V_{ce} 才开始下降，反向恢复过程结束后，续流二极管截止， V_{ce} 到达饱和值，换流过程完成。

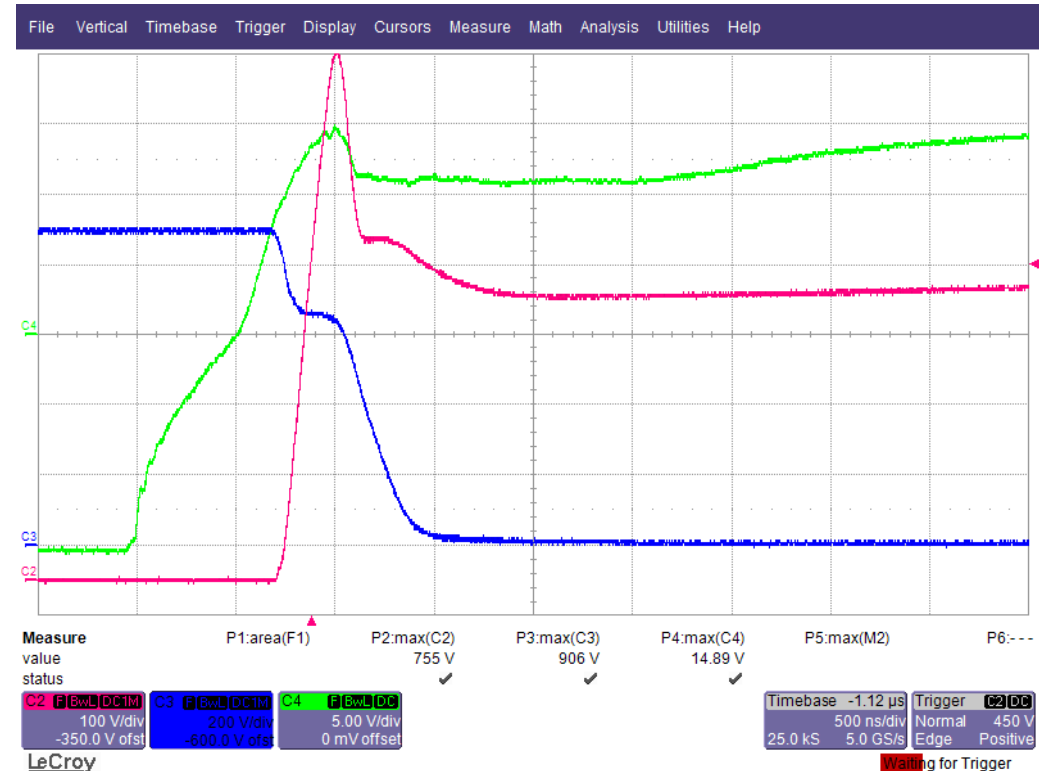
。



双脉冲实验的关注点----开通过程

右图是IGBT实测开通波形，我们需要关注的点是：

1. 二极管的反向恢复电流的 di/dt ，
2. 二极管的反向恢复电流的峰值，
3. 反向恢复后电流是否有震荡，拖尾有多长，
4. V_{ce} 电压是否正确变化
5. 测算出损耗，(依赖示波器功能)



红线: I_c

蓝线: V_{ce}

绿线: V_{ge}

调整门极电阻 R_{gon} 可以强烈地影响该过程，用以确定 R_{gon} 的数值是否合适。

关于二极管的讨论

IGBT中的续流二极管，实际上是一个非常重要的元件，但往往容易被忽视。请注意以下几条：

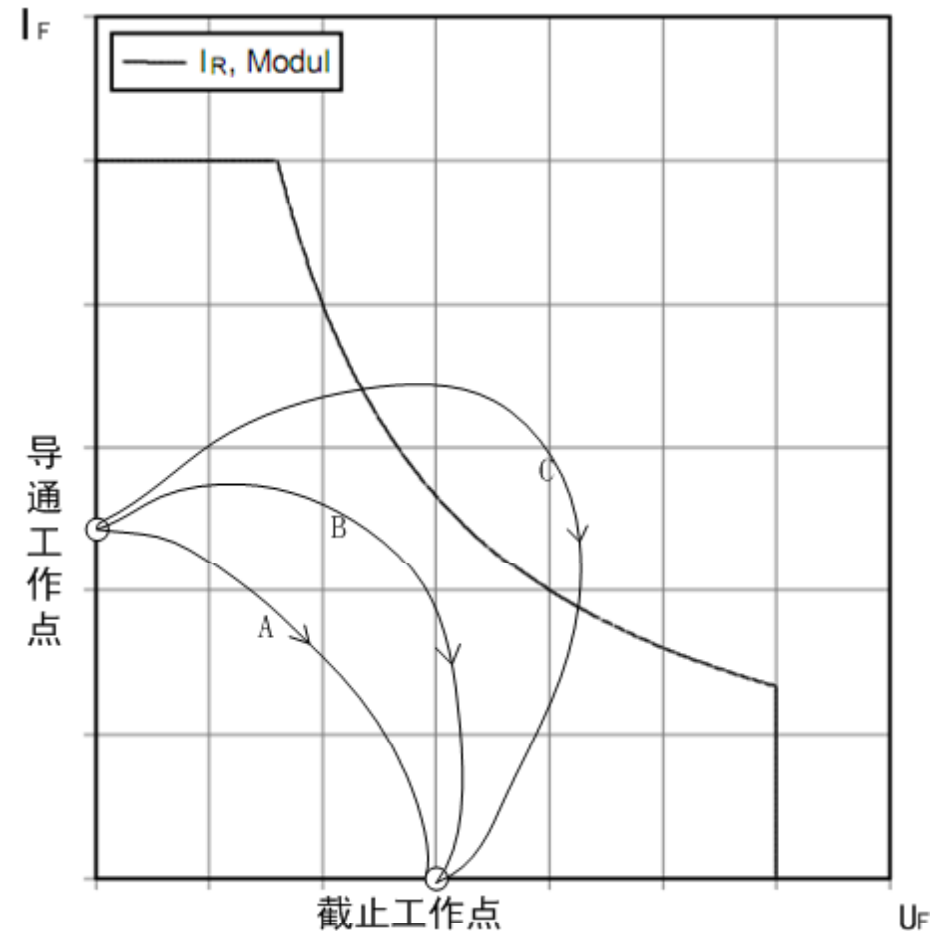
1. 在IGBT开通的时刻，实际上是续流二极管关断的时刻。
2. 所有的功率半导体，包括IGBT芯片和二极管芯片，在关断的时刻面临的风险远大于其开通时面临的风险。换句话说，在IGBT关断的时刻，IGBT芯片的损坏风险是最大的；在IGBT开通的时刻，二极管芯片的损坏风险是最大的。
3. IGBT芯片出现短路时，驱动器可以帮忙保护；但二极管芯片损坏时，没有其他的防护手段

IGBT开通过程中二极管的风险点（1）

右图是二极管的安全工作区的示意图。实际上这是一条恒功率曲线。其意义是：二极管在反向恢复过程中，其瞬时功率不能超过规定的数值，否则就有损坏的风险。

因此，二极管的瞬时功率是重要的判断标准。

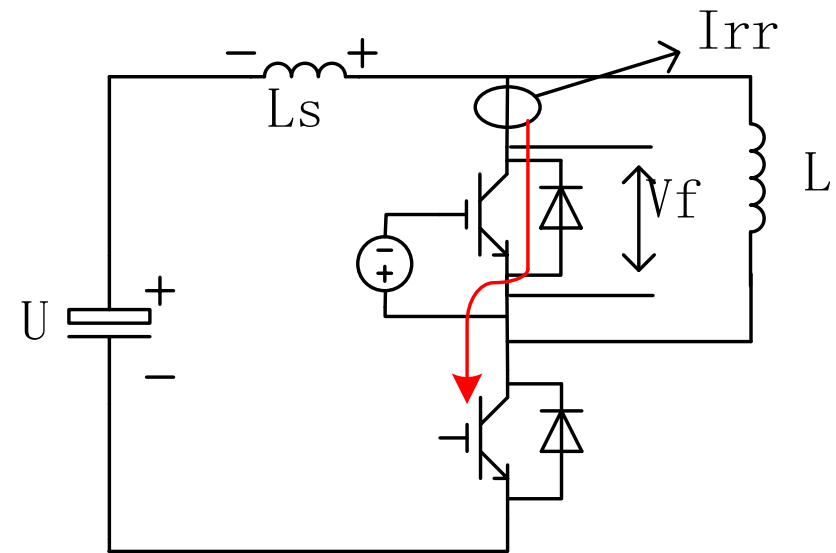
二极管在反向恢复的过程中，实际上是其工作点从导通过度到截止。其工作点的运动轨迹有多种选择，如右图所示。显然，轨迹A是最安全的，轨迹C则是危险的。



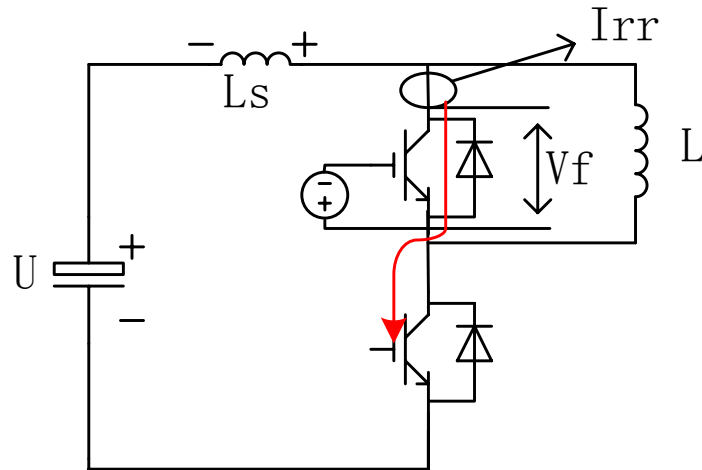
二极管的风险点的测试方法

右图是评估二极管的方法的示意图：

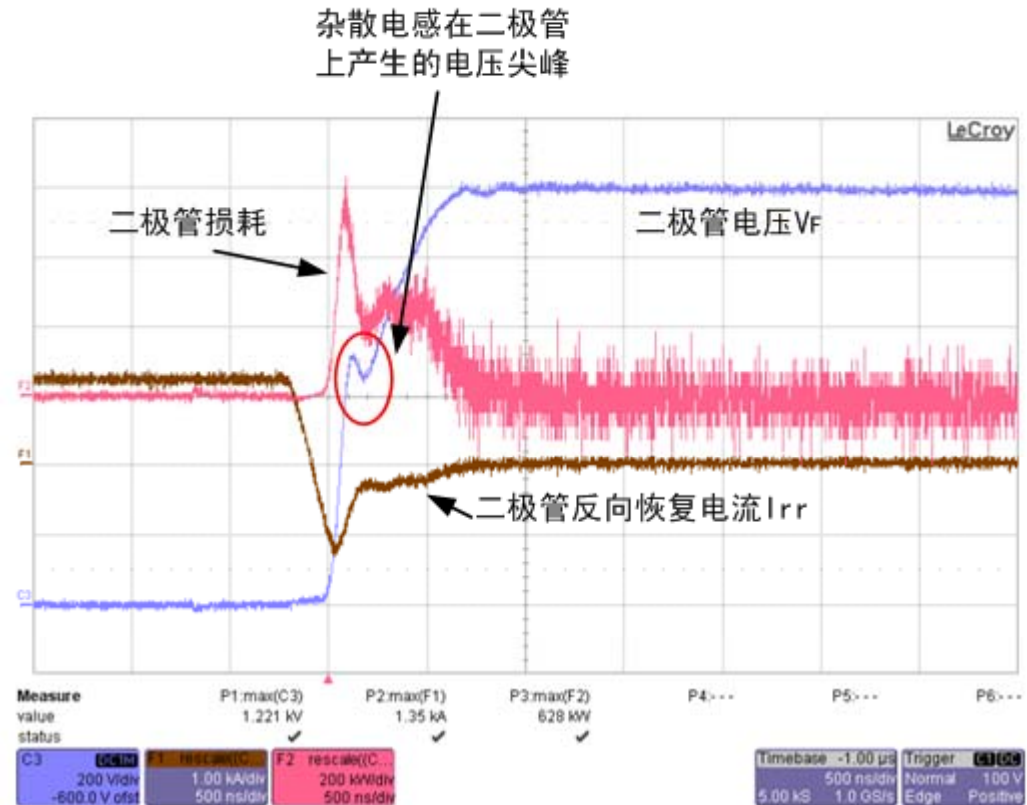
1. 将电流探头加在上管IGBT的集电极；
2. 将电压探头加在上管IGBT的CE极间；
3. 将电压及电流的瞬时值的积做为一个函数通道，表示二极管的瞬时功率；
4. 用示波器捕捉上管二极管的反向恢复时刻；



IGBT开通过程中二极管的风险点（2）

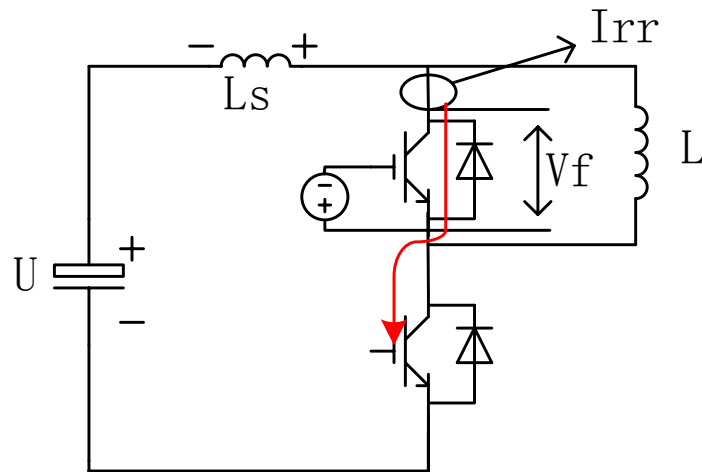


右图表示的是二极管反向恢复时，实测的电压及电流波形，同时利用示波器计算出瞬时功率的波形。

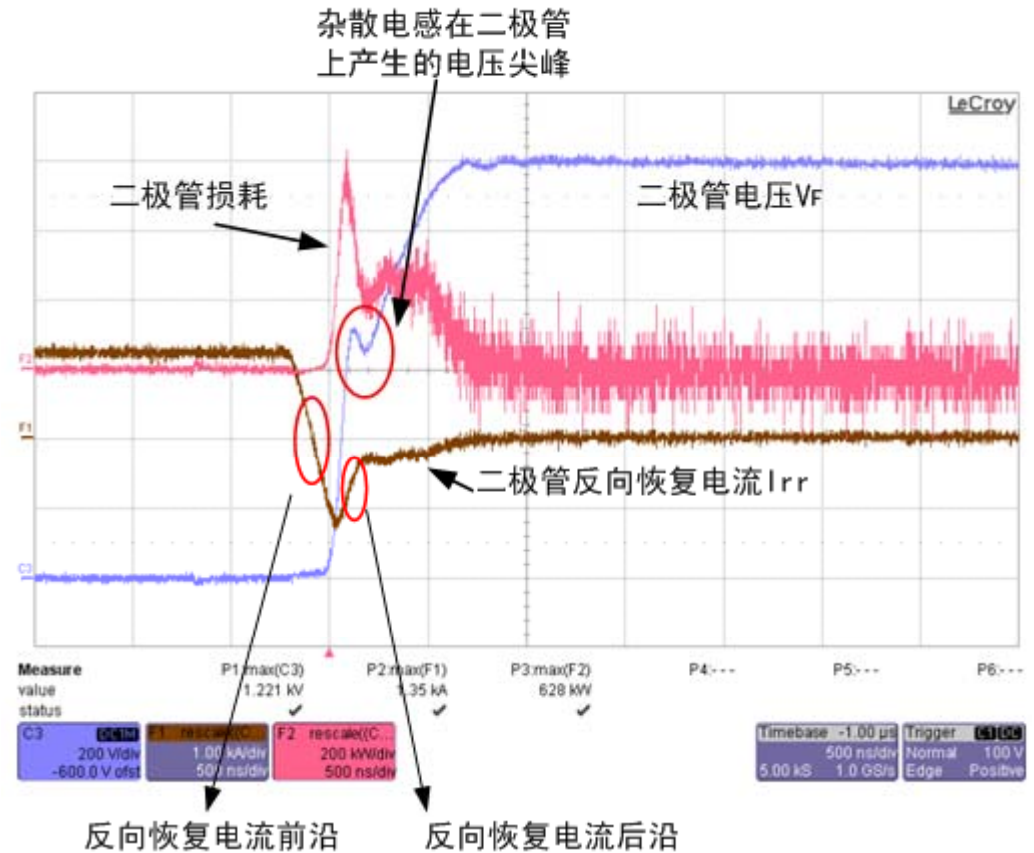


二极管反向恢复电流上升时，杂散电感上产生的电压是与母线电压相抵的。反向恢复电流下降时，杂散电感电压与母线电压同向，电压落在二极管上，二极管出现电压尖峰，风险加大。如果杂散电感比较大，二极管就更加危险了，容易跑出安全工作区。

IGBT开通过程中二极管的风险点（3）



二极管的电压尖峰是由于杂散电感与二极管反向恢复电流的后沿相作用而产生的。所以减小直流母排的杂散电感及优化反向恢复电流的后半沿的斜率都可以有效提高二极管的安全裕量。

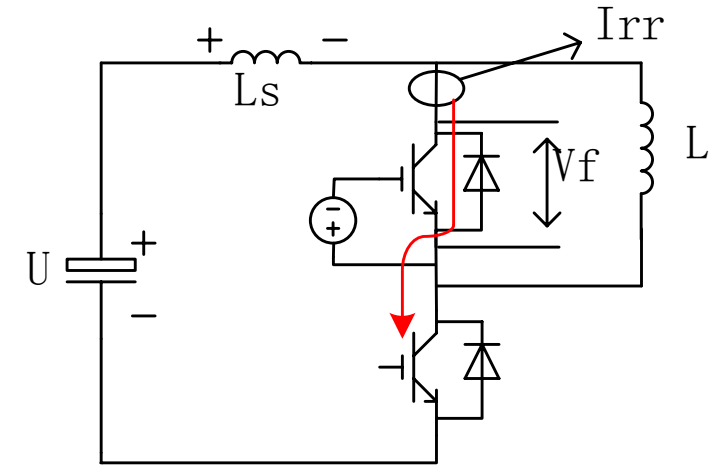


图中红色线为二极管的瞬时功率，在二极管反向恢复电流达到最大值后，二极管的功率也达到最大值，如果此时二极管电压尖峰明显，则二极管损坏的风险将大大增加，因此杂散电感大小对二极管意义也很大。

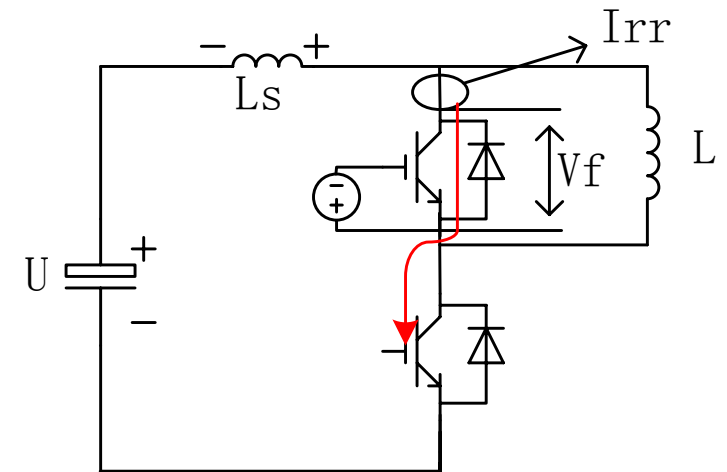
二极管的风险点---小结

1. 二极管的反向恢复电流的前沿对应杂散电感上产生的电压方向是与母线电压相抵的，因此没有风险；

2. 反向恢复电流的后沿对应杂散电感上产生的电压的方向与母线电压相同，二极管会承受此电压尖峰，同时也会出现瞬时功率的尖峰，因此是最危险的时刻。



反向恢复电流的前沿



反向恢复电流的后沿

IGBT开通过程中二极管的风险点（4）

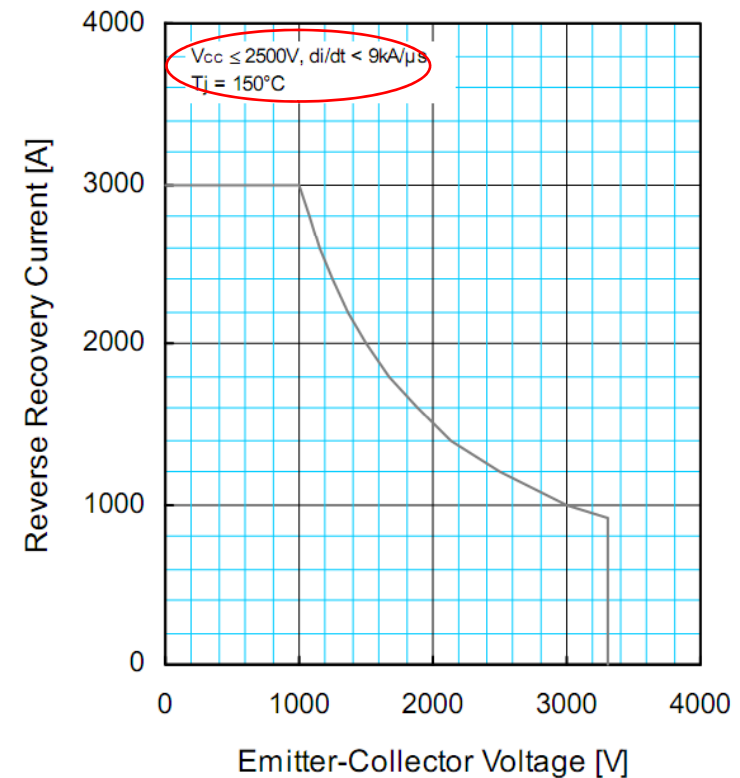
Rückstromspitze
peak reverse recovery current

$I_F = 1500 \text{ A}$	$- di_F/dt = 4500 \text{ A}/\mu\text{s}$	$T_{vj} = 150^\circ\text{C}$	$T_{vj} = 25^\circ\text{C}$	I _{RM}	1500	A
$V_R = 1800 \text{ V}$			$T_{vj} = 125^\circ\text{C}$		1800	A
$V_{GE} = -15 \text{ V}$			$T_{vj} = 150^\circ\text{C}$		1850	A

通常在IGBT的datasheet中，关于二极管的部分会注明反向恢复电流的最大的di/dt水平，通常不能超过这个数值。否则可能导致反向恢复电流震荡。在右图该边界为9kA/us。

二极管反向恢复电流的形状主要取决于IGBT厂商的设计，其前沿的斜率及后沿斜率在很大程度上受R_{gon}的影响。一旦增大R_{gon}，反向恢复电流则会缓和很多。在大功率的场合，通常需要追求的二极管的软度，而这主要体现在反向恢复电流的后沿的形状上。

FREE-WHEEL DIODE REVERSE RECOVERY
SAFE OPERATING AREA (RRSOA)



CM1500HC-66R的二极管的
安全工作区曲线

续流二极管的风险与外部参数的关系

在外部参数发生变化时，二极管的风险也在发生变化，在此，我们举个参数，

1. 结温，
 2. 续流电流的大小，
 3. 母线电压的高低
-
- A. 当结温越低，二极管的速度越快，反向恢复电流后沿也越陡峭，产生的电压尖峰也越高，情况越恶劣；
 - B. 二极管关断大约10%的额定电流时，其关断时的功率会出现最高峰，关断1倍额定电流时，功率次之，关断2倍额定电流时，功率再次之；也就是说，电流越小，情况越恶劣；
 - C. 母线电压越高，情况越恶劣；

通过开通过程观察并联的动态均流水平

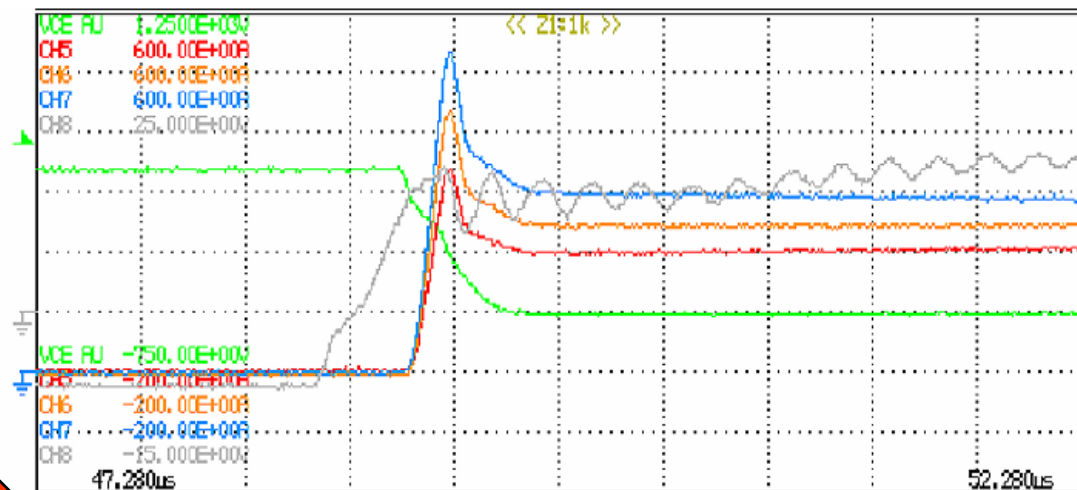
在IGBT开通时， R_{gon} 的影响很大，它可以影响 di/dt 的速度，反向恢复电流的峰值，进而决定开通损耗。

所以确定 R_g 最好的方法是靠双脉冲测试法，动态调试该参数。

双脉冲测试在并联中的应用！



下图是在3个IGBT并联的情况下测试的开通波形，蓝橙红分别为3个IGBT的 I_c 。用此方法可以很准确的测试出动态均流的情况。从而进行动态均流调试。



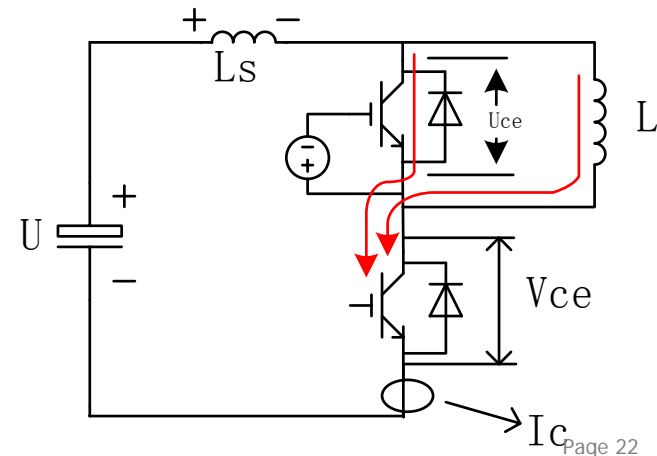
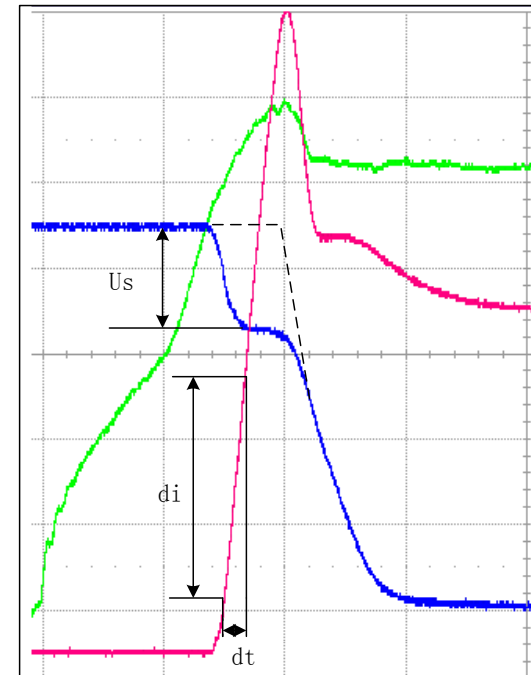
利用开通过程测量主电路杂散电感

在IGBT开通时， I_c 开始增长，而此时上管IGBT的续流二极管处于反向恢复，该二极管没有阻断能力，上管 $U_{ce}=0$ 。

在 I_c 开始增长时，杂散电感上感应的电压的方向如图所示，是与母线电压相反的，所以此时在下管的 V_{ce} 上测得的波形出现了一个缺口，如右图波形中的虚线所示。这个缺口电压产生的原因是杂散电感抵消了一部分母线电压。也就是说，缺口的电压是杂散电感上的感应电压。

$$U_S = L_S \times \frac{di}{dt}$$

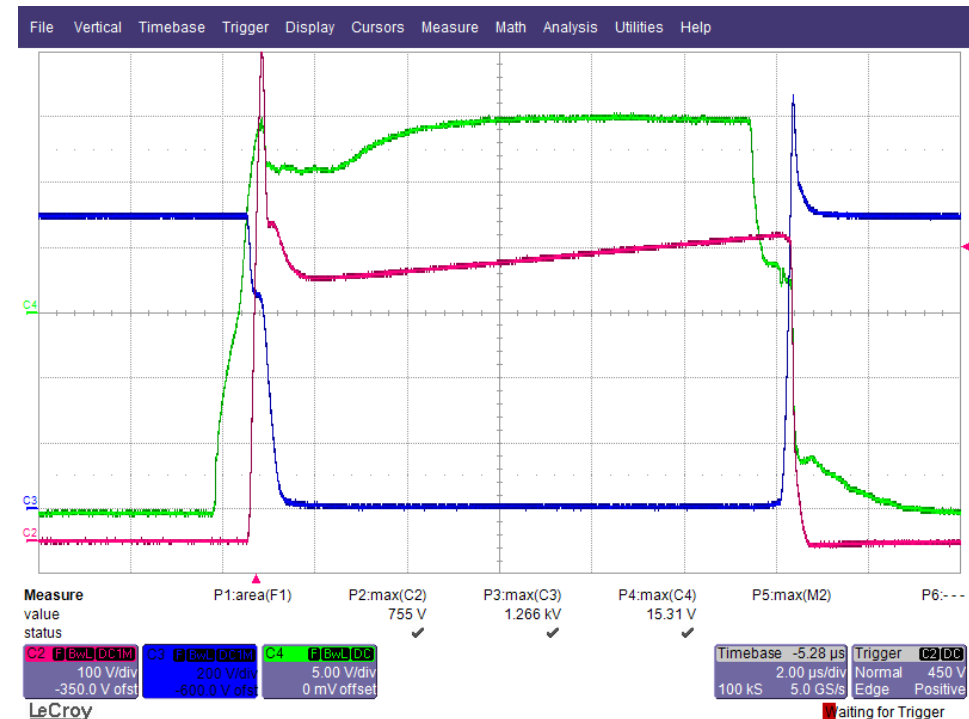
从示波器上读出 U_S ，再读出 di/dt ，代进上式，就能算出杂散电感 L_S 的数值。
这个模型是比较准确的，因此得出的数据比较可靠。



双脉冲实验的关注点----关断过程

关断过程的关注点为Vce的电压尖峰，它是直流母线杂散电感与 di/dt 的乘积，通过观察这个尖峰，可以评估IGBT在关断时的安全程度。

Vce尖峰一般都客观存在，在短路或者过载时，这个尖峰会达到最高值，比正常工作时要高得多，通常可以使用有源钳位电路(Active Clamping)进行抑制。



对关断过程中电压尖峰的认识

通常在大功率的IGBT的应用中，有源钳位的功能是非常必要的，而功率越小，必要性越低。其原因是随着系统的功率变大，IGBT的 di/dt 会增大，且杂散电感也会越大，因此电压尖峰会越高。

下表说明不同IGBT在关断额定电流时的 di/dt 的水平(从datasheet中计算出):

IGBT型号	关断额定电流时的 di/dt
FF150R12KT4	1500A/us
FF1400R12IP4	7000A/us
FZ2400R17KE3	15000A/us

在IGBT短路时，关断短路电流的 di/dt 会更高，比关断额定电流要高很多，因此短路时电压尖峰更高。所以有可能出现，驱动器发现了IGBT的短路现象，并且也及时关断，但是由于 di/dt 太高，产生了非常高的电压尖峰，在关断该短路电流后仍然可以打坏了IGBT。这时，有源钳位电路就非常必要。

假设母排杂散电感为100nH，则在7000A/us的电流变化率下，电压尖峰将高达700V。

怎样科学准确地确定驱动电阻和门极电容

双脉冲实验中，可以准确地观察到半导体芯片在某种温度下的开通或者关断行为，与真实的某种应用相比，其结果具有极高参考价值，可以这样说，在该实验中表现出来的行为，就是IGBT在实际应用中的行为。

1. 在做开通测试时，IGBT的开通速度，会极大地影响二极管的安全程度，及损耗的大小，可以据此调整出合适的开通电阻 R_{gon} ;
2. 在做关断测试时，IGBT的关断速度，可以决定IGBT是否超出RBSOA（安全工作区），及损耗的大小，可以据此调整出合适的关断电阻 R_{goff} ;
3. 门极电容 C_{ge} 对于不同的IGBT，有很不一样的影响，不是所有IGBT都需要 C_{ge} ，不能盲目添加，通过校核开通及关断来确定其取值是最为科学的方法；

为什么要用双脉冲，单脉冲不行吗？

在大部分电力电子装置中，负载的电感量都比较大，在IGBT关断后，电感电流一般不会断流，二极管会一直续流，在此时开通IGBT，会有二极管的反向恢复过程。而单脉冲实验中是没有二极管反向恢复过程的，因而双脉冲实验比单脉冲实验真实。

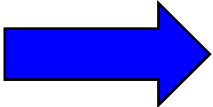
但是单脉冲实验可以充分观察关断过程，如果只需要关注关断过程，则单脉冲实验也是可以的。

实验前的计算工作

在这个实验中，涉及4个物理量：

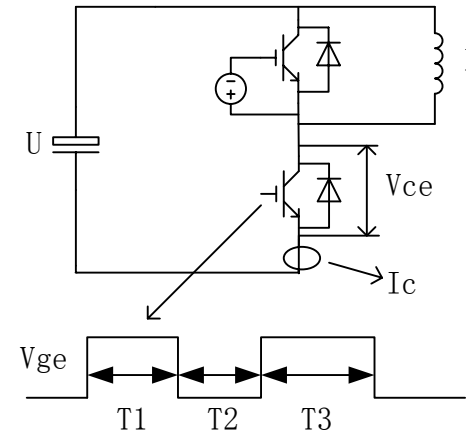
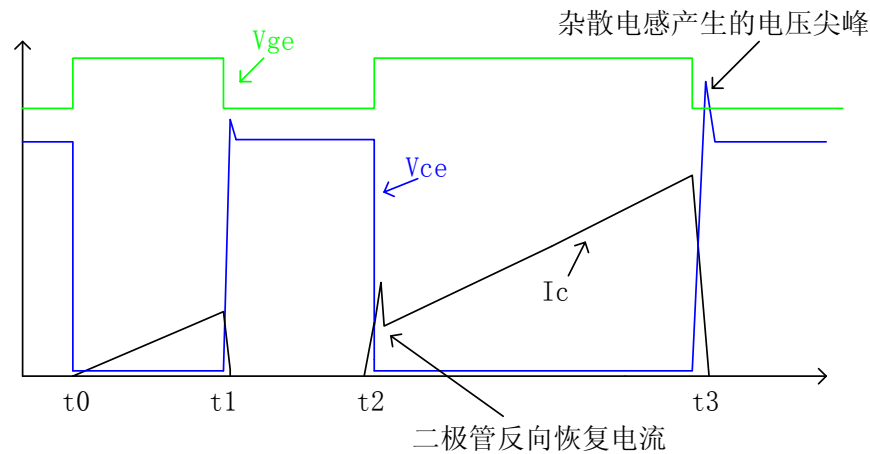
1. 母线电压(U)
2. 电感电流(I)
3. 电感量(L)
4. 脉冲宽度 (t)

它们之间的关系用下面的式子建立起来：


$$I = \frac{U \cdot t}{L}$$

我们以FF1000R17IE4为被测对象，做一次计算：

实验前的计算工作



U取IGBT的额定母线电压：
1100V

I取此IGBT的安全工作区的
边缘：2000A，

L取实验室条件下简单绕制的
空心电感：28uH

$$\text{代入 } I = \frac{U \cdot t}{L}$$

$$\text{得 } t = 51\mu\text{s}$$

从上图可知，要使电流在第二个脉冲关断时到达2000A，则2个脉冲的宽度之和为：

$$T1 + T3 = 51\mu\text{s}$$

实验前的硬件准备工作

我们需要的硬件包括：

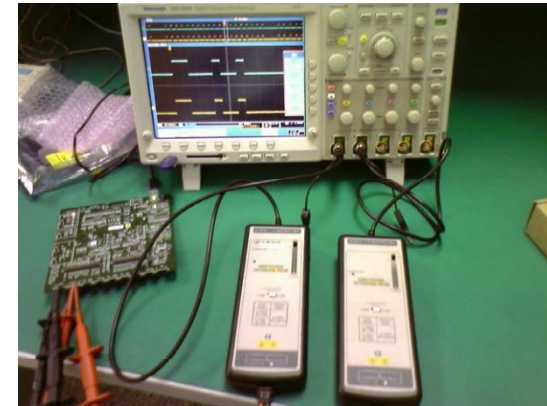
1. 高压电源
2. 电容组
3. 叠层直流母排
4. 负载电感（可以自己绕制，不要饱和即可）
5. 被测IGBT及驱动电路
6. 示波器（最好是4通道，高带宽）
7. 高压差分电压探头
8. 罗氏线圈电流探头
9. 可编程信号发生器或简易信号发生装置（发出一组双脉冲信号）

实验仪器及硬件

罗氏线圈电流探头：



多通道示波器及高压差分探头：



手工绕制的空心电感：



双脉冲测试实验台



但是对于开发电力电子装置的工程师，无须专门搭建测试平台，直接使用正在开发中的变流器即可。在该平台上得到的信息可以充分反映变流器的实际情况。