

1200V 超快恢复二极管及其应用

在现代社会中，电力已经成为最重要的能源。计算机设备（桌面电脑，平板电脑，服务器包括 UPS），电动汽车（动力及充电系统），光伏发电装备，风力发电装备等等都是最为常见的电能消耗以及产生装置。提高这些电力系统装置的效率正变得越来越重要。1200V 功率二极管可以帮助提高系统的效率。

作者：Nick Koper, 胡爱斌博士, 刘源, 瑞能半导体

DC 电压

在电能转换系统中，低压系统比高压系统有着更高的能量损耗。所以在最新的手机及平板充电系统中（USB-PD, 9V, 12V 甚至是 20V 开始逐渐出现。早期的 5V 系统逐渐淡出。

当然了，手机和平板是低的功率系统（1W 到 10W），但是在大功率系统（>1KW）中可以看到同样的趋势。

大功率转换系统像 UPS, 光伏逆变，充电桩大量使用 boost/flyback, Buck/Forward, Resonant 等拓扑的变换器。Flyback 和 Forward 变换器基本是 Boost 和 buck 转换器的绝缘版。

一般来说这种系统里最高的 DC 电压大概是 400V 左右。在很多新型的大功率系统中，为了获得更高的效率，700V 或者更高的 DC 电压会被使用。基于同样的理由，现在越来越多的手机使用的 USB-PD 电压是 12V 而不是传统的 5V USB 电压。

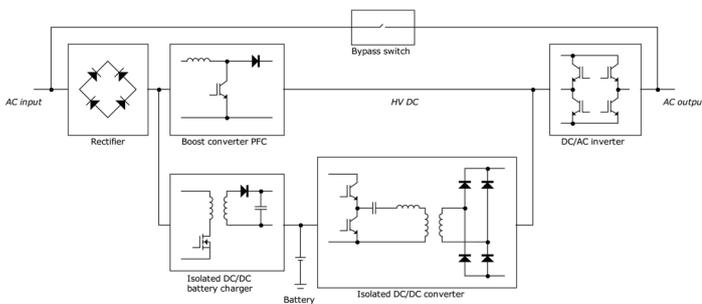


图 1: 由不同 DC/DC 模块组成的 UPS 系统结构图

硬开关，软开关以及由于二极管特性引起的损耗

硬开关和软开关是 DC-DC 变换器中的两种开关方式。双极型的 PN 二极管在这两种开关方式下表现完全不同。我们可以通过工作在 CCM 的 boost 变换器和 LLC 谐振变化器来研究二极管开关行为。CCM boost 变换器基本上是硬开关方式，而 LLC 谐振变换器是软开关方式。

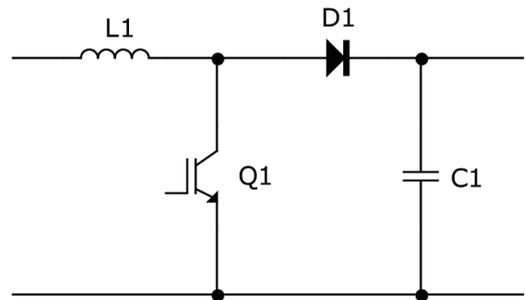


图 2: Boost 电路原理图

硬开关

连续导通模式（CCM）boost 转换器通常在电源系统中的功率因数校正（PFC）电路中使用。

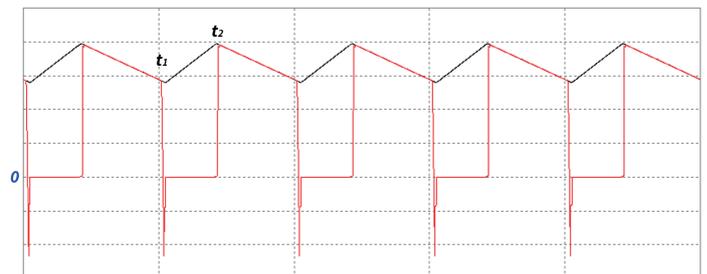


图 3: (CCM) boost 转换器中通过二极管的电流 (仿真波形); 黑色 = I_{L1} , 红色 = I_{D1}

t_1 时刻，开关管 Q1 导通，电感中的电流上升，同时二极管停止导通。T2 时刻开关管 Q1 关断，电流开始通过二极管。而此时在漂移区只有少量的载流子（电子和空穴）。这就使得二极管的初

始阻抗相对较高从而二极管压降 (V_{fr}) 也相应升高。经过一段时间 (t_{fr} - 数量级大概是 10 to 100 ns), 足够的载流子被注入到了漂移区, 二极管阻抗大大下降直到等于静态压降 V_F 。由于二极管开关所导致的能量损耗大概等于:

瑞能半导体有限公司简介

瑞能半导体有限公司是由恩智浦半导体与北京建广资产管理有限责任公司强强联手共同投资建立的高科技合资企业, 于 2016 年 1 月 19 日宣布正式开业, 运营中心落户上海。

瑞能半导体注册于南昌, 全资子公司和分支机构包括吉林芯片生产基地、上海和英国产品及研发中心、香港销售分公司、以及遍布全球其他国家的销售和客户服务点。

作为全球功率半导体行业的佼佼者, 瑞能半导体受益于恩智浦先进的双极性功率技术以及建广资产在中国制造业和分销渠道的强大资源网络, 致力于改善和研发业界领先的功率半导体器件的产品组合, 包括可控硅整流器、功率二极管、高压晶体管、碳化硅等, 广泛应用于全球汽车、电信、计算机与消费电子、智能家电、照明、电源管理等各市场领域, 帮助客户实现更高的成本效益和生产效率, 助力中国以及全球智能制造的发展。

$$E_{sw-on} = \frac{1}{2} \cdot I_F(t_2) \cdot V_{fr} \cdot t_{fr} \quad (1)$$

损耗 E_{sw-on} 完全是消耗在二极管本身。

开启后, 电流仍然流过二极管并且慢慢减少。这个过程持续到开关管 Q1 再次关断。二极管导通期间功率的损耗如下:

$$E_{cond} = \int_{t_2}^{t_1} V_F(I_F) \cdot I_F(t) \cdot dt \quad (2)$$

这个可以被近似为:

$$E_{cond} = \overline{V_F} \cdot \overline{I_F} \cdot (t_1 - t_2) \quad (2a)$$

这里的 $\overline{V_F}$ 和 $\overline{I_F}$ 是 V_F 和 I_F 各自的平均值。所有的损耗都耗散在二极管本身。

在每个 Q1 关断时刻, 整个过程会重复。

在 (t_1) 时刻, D1 被关断, 其中的电流没有马上降到零。在这种情况下, 双极型的二极管不能马上阻断电流。在一个双极型二极管中, 漂移区的存储电荷必须在电流被阻断之前被抽出。反向电流加上存储电荷可以从图 3 中很清楚的观察到。存储电荷 (Q_s) 的抽离引起了关断损耗 (E_{sw-off})。跟关断有关的损耗跟存储电荷需要通过的电压降成比例。一般在 boost 电路中, 压降跟

WeEn Semiconductors
Innovation Changes Life

1200V Hyperfast Diodes,
Handle the Electric Energy Efficiently.

www.ween-semi.com
marcom@ween-semi.com

boost 电路输出电压 (V_{out}); 相等。也就是说存储电荷在初始的时候是在 V_{out} 水平然后被“运输”到了地电势 (0 V)，这是因为 Q1 闭合了。

$$E_{sw-off} = V_{out} \cdot Q_s \quad (3)$$

存储电荷 Q_s 是流过二极管的电流 (I_F) 和载流子寿命 τ_a 的乘积。

$$Q_s = I_F \cdot \tau_a \quad (4)$$

综合 (3) 和 (4) 和已知关断时间在 t_1 , 关断损耗可以表达为:

$$E_{sw-off} = V_{out} \cdot I_F(t_1) \cdot \tau_a \quad (5)$$

能量损耗 E_{sw-off} 一般来说, 只有部分耗散在二极管本身; 大部分是损耗在开关管上。

双极性电荷载流子的寿命周期 τ_a 不是一个常量; 寿命随着器件中电流密度的降低而降低。这就使得选择一个较小的二极管会有有效的降低系统的损耗, 尤其是在开关损耗大大高于导通损耗的情况下。虽然使用较小的二极管会引起导通损耗的增加, 但是增加部分小于开关损耗的较少。具体请参阅方框内的文字解释“导通损耗和开关损耗”。

电荷载流子寿命随着温度的升高而增加。所以为了降低开关损耗, 有必要让二极管保持在较低的工作温度。

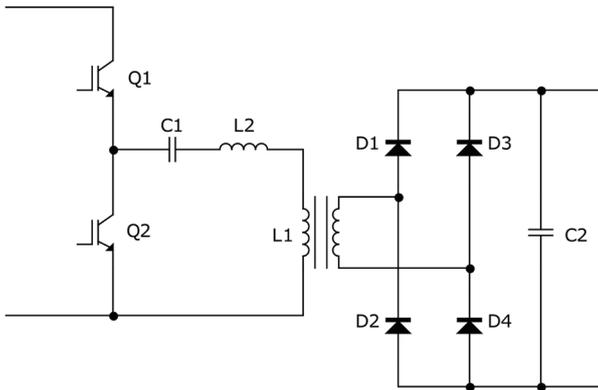


图 4: LLC 谐振转换器原理图

软开关

在 UPS 或者光伏逆变器中, 经常会看到 LLC 谐振转换器的身影。开关管 Q1, Q2, 以及 L1 (变压器电感), L2 (变压器漏感), C1 (串联电容) 共同生成了流出二次侧的正弦电流 (或者类正弦)。正弦电流被整流桥 (D1, D2, D3, D4) 整流后得到 C2 两端的直流电压 DC 流经 D1 和 D4 组合 (或者 D2, D3 组合) 在开关时基本上为零。

因为二极管是在过零点时开启, 二极管的开启损耗要比在硬开

关拓扑中低很多 - V_{fr} 非常的低, 有时候甚至观察不到。计算开启损耗的等式 (1) 是针对硬开关的, 在软开关的拓扑中 I_F 接近于零, 所以开启损耗基本上为零。

开关损耗和导通损耗

在半导体的开关管中 (二极管, 三极管, MOSFET 等等), 两个方面决定了大部分损耗: 电流导通和电流开关。

导通损耗 (通态损耗) 可以通过把半导体器件做的更大来降低。

开关损耗是由于半导体器件中充电状态的改变造成的: 越多电荷参与状态转换就会引起更大的损耗。

开关损耗可以通过以下方法降低:

- (1) 把器件做得更小;
- (2) 调整器件的工作方式, 使得更少的电荷参与开关转换。通常的副作用就是会引起导通损耗的升高。

开关损耗是跟开关速度成正比的, 当开关速度较低的时候, 导通损耗会占主导; 这时选择大的器件会得到较低的功率损耗。频率较高的时候, 必须要权衡导通损耗和开关损耗以达到最低的总损耗。这种情况下, 最优的器件是 (1) 较小的器件 (2) 开关特性得到优化, 或者两者皆有。为了降低总损耗, 有时候必须接受导通损耗的升高。

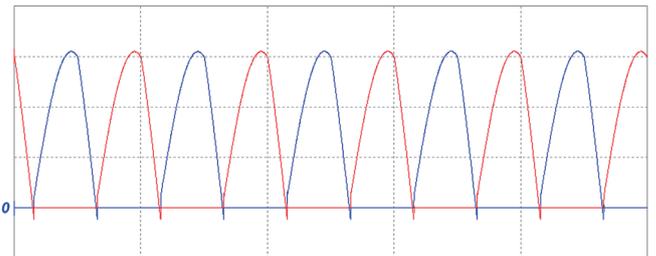


图 5: LLC 谐振变换器中二极管的电流波形 (仿真) 蓝色 = I_{D1} and I_{D4} , 红色 = I_{D2} and I_{D3}

二极管的关断损耗是非常低的, 这是因为此刻流过的电流接近零。同样的, 等式 (3 or 5) 仍然成立, 但是 I_F 比在硬开关拓扑中低很多。可以从图 5 中二极管的反向恢复电流波形中看出, 电流只是稍微的过零点, 整体的关断损耗也相应的降低了。

这里对二极管主要的要求是能匹配上 LLC 谐振转换器的开关速度。

此外, 导通损耗是不能避免的。等式 (2) 中给出了导通损耗的计算方法。

因为开关损耗在软开关拓扑中占比较少，同样的双极型二极管可以用在更高的频率。

1200V 二极管

超快恢复二极管需要进行寿命控制来达到更快的开关速度（参阅“寿命控制”）- 原理上，600V 快恢复管和 1200V 快恢复管没有区别。但是，与 600V 二极管相比，1200V 二极管需要更宽的漂移/耗尽区来达到 1200V 耐压。更宽的漂移区意味着抽离存储电荷形成耐压需要更长的时间。为了研发一个跟 600V 快恢复管同样速度的 1200V 快恢复管，需要把载流子的寿命降得更低。这些额外的寿命控制会使得 V_F 升高，而引起导通损耗升高。由于这个原因，我们可以看到 600V 超快恢复管的反向恢复时间在 20ns 左右，而同样的 1200V 二极管，恢复时间大概在 60ns 左右。

如何在导通损耗和开关损耗中权衡，对于 600V 快恢复管来说是一个挑战，对于 1200V 快恢复管来说，更难以权衡。图 6 给出了 1200V 快恢复管 (FRD) 在 125°C 的 I_F - V_F 特性。其中 BYC30-1200P 为瑞能半导体公司的 1200V、30A 的快恢复管。图中同时给出了竞品 A 和竞品 B 的特性。在 30A 的电流条件下，竞品 A、BYC30-1200P 和竞品 B 的导通压降 V_F 分别为 2.03V，2.17V 和 2.30V。图 7 给出了 1200V 快恢复管 (FRD) 在 125°C 的反向恢复特性。和竞品 B 相比，BYC30-1200P 具有更好的反向恢复软度。BYC30-1200P 和竞品 A 具有类似的反向恢复软度，但是其反向恢复的电荷更低。通过计算图 7 中电流在反向恢复过程中和横轴围成的面积可以给出反向恢复的电荷。在 $I_F=30A$ ， $V_R=400V$ ， $dI_F/dt=500A/\mu s$ 的条件下，竞品 A、BYC30-1200P 和竞品 B 的反向恢复电荷 Q_{rr} 分别为 1845nC，1570nC 和 1879nC。图 8 给出了 1200V 快恢复管 (FRD) 在 125°C 的导通压降 V_F 和反向恢复电荷 Q_{rr} 的折衷特性图。和竞品 A 和竞品 B 相比，BYC30-1200P 具有更好的折衷特性。

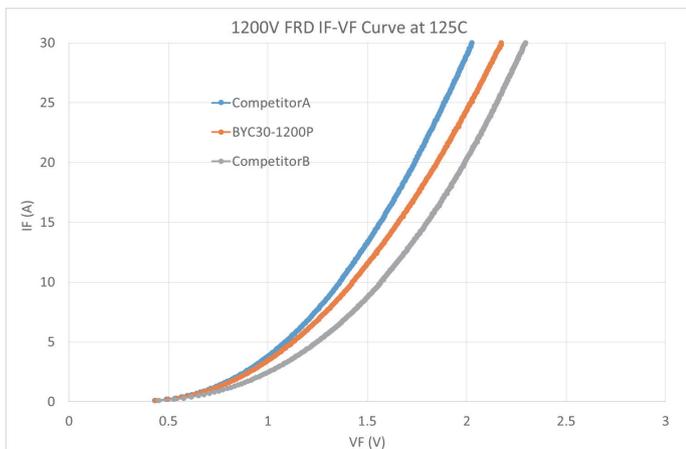


图 6: 1200V 快恢复管 (FRD) 在 125°C 的 I_F - V_F 特性

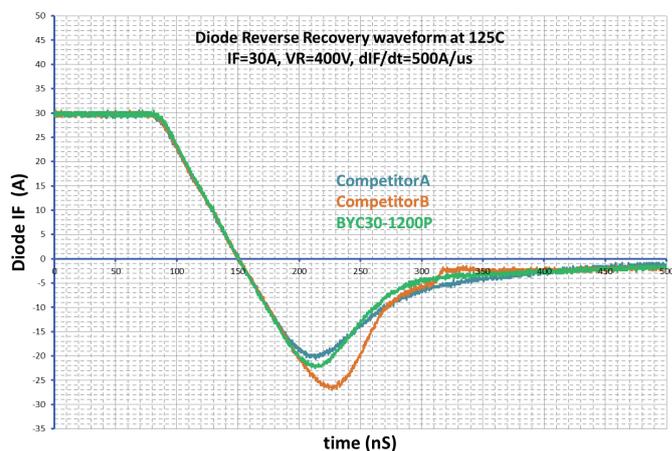


图 7: 1200V 快恢复管 (FRD) 在 125°C 的反向恢复特性

寿命控制

半导体开关或者是单极型的比如肖特基二极管和 MOSFETs，或者是双极型的比如 PN 二极管和三极管。

在单极型器件中，只有电子或者空穴导电，而在双极型的开关中，电子和空穴同时导电。单极型器件的一个优点是开关速度快。而双极型器件的优点是他们的导电能力更强。

由于电导调制现象，双极型器件在同样尺寸的条件下，比单极型器件的导电能力更强。

但是电导率调制也有不好的一面，当一个双极型器件导电的时候，高浓度的载流子（电子和空穴）被注入到器件的漂移区。当双极型器件

需要关断的时刻，多余的载流子必须被抽离出漂移区，才能阻断电流：双极型器件不能马上关断。要么等到空穴和电子在漂移区复合要么主动的把这些载流子抽离出来。在电流阻断之前，主动抽离的载流子形成了所谓的反向恢复电流。

注入到漂移层的电荷浓度取决于载流子的寿命。在一般的硅器件，有效的载流子寿命大概是微秒级 (μs)。

对于工频 (50Hz 或者 60Hz) 的整流二极管来说，载流子的寿命不是问题。但是在需要快速开关的场合，寿命控制必须要来降低载流子有效寿命。

载流子寿命的降低意味着漂移区电荷浓度的降低。这就引起了导电能力的下降 (高 V_F)，同时可以加快空穴电子的复合：二极管开关更快了 (低 t_{rr})。

电荷寿命可以通过在硅片中扩散低浓度的金或者铂金来控制。金或者铂金的原子作为复合中心会加快电子和空穴的复合。

同时，复合中心在关断的时候也能成为产生中心。这就使得掺金或者掺铂金的二极管跟没掺杂的二极管相比有较高的漏流。二极管越快，漏流越高。而且随着温度的升高，漏流会越来越高，如果控制不好会产生热奔。掺金和掺铂金的二极管最大的区别就是在同样的工作温度下，掺金的二极管漏流会更高。所以掺铂金的二极管可以工作在 175 度以下，而掺金的二极管只能工作在 150 度以下。

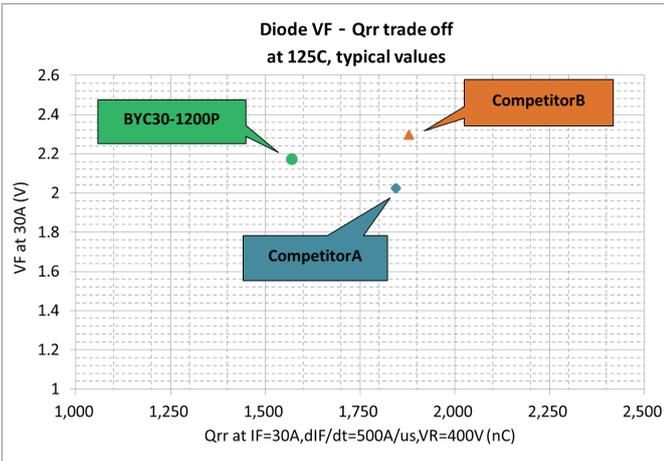


图 8: 1200V 快恢复管 (FRD) 在 125°C 的导通压降 VF 和反向恢复电荷 Qrr 的折衷特性特性图

漏流与高温工作能力

加在双极型二极管终端的反偏电压会导致漏流。超快恢复二极管需要高浓度的复合中心（参阅“寿命控制”）来实现快速开关的能力，但是这些复合中心同时也能作为产生中心，产生漏流。而且当温度升高时，产生中心会增加，进一步增大漏流。当一个快恢复管必须可靠的工作在高温的条件下，漏流引起的损耗一定不能造成热奔。为了实现超快恢复二极管这些特性，必须选择合适的寿命控制技术。传统的“掺金”工艺通常不能使超快恢复二极管工作在 150°C 以上。一种增强的“掺铂”工艺可以使得二极管工作在最高 175°C 的情况。瑞能半导体的 1200V 快恢复管都采用掺铂的工艺，其最大结温可以达到 175°C。在 150°C，VR=1200V 的反偏电压下，器件的漏电流小于 1mA。

选择适合的寿命控制技术以及合理的导通与开关损耗的折衷，整个开关电源系统有望达到高效率，低成本的要求。图 9 给出了 Boost PFC 在 20KHz 开关频率下的对比结果。在效率测试中，开关管采用 IGBT，对应的开关频率为 20KHz。在对比测试中，除了更改测试用的快恢复管，其他的条件均不变。

我们测试了 500W 和 1000W 输出功率下系统的效率。从图 9 可以看出，和竞品 A 和竞品 B 相比，瑞能半导体的 BYC30-1200P 具有最高的系统效率。

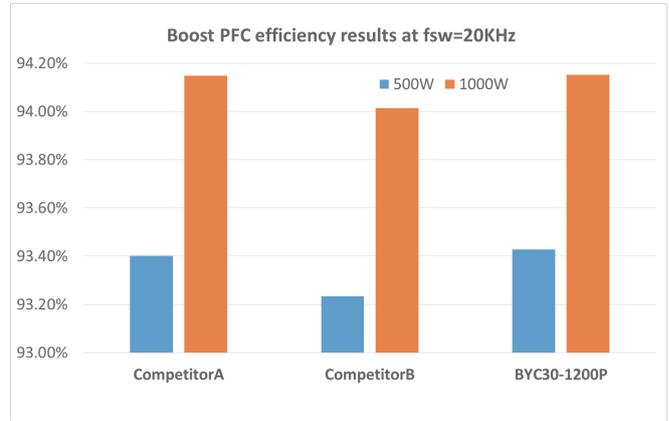


图 9: Boost PFC 在 20KHz 开关频率下的对比结果。

基于前面的讨论，瑞能半导体的 1200V 的快恢复管具有优化的导通压降和反向恢复电荷，因此在实际应用中具有更高的系统效率。另外，通过设计和寿命控制的优化，快恢复管具有 175°C 的最大结温，更适合在高温条件下工作。因此瑞能半导体的 1200V 的快恢复管最适合在 UPS、光伏逆变、电动汽车动力及充电系统以及其他的开关电源中应用。

www.ween-semi.com