

功率半导体器件工作原理

1. 基本开关过程:

功率半导体器件除极少数特殊应用情况外，其余绝大多数都是应用在开关状态下。应用在所有这些电力电子线路总的器件，它们的基本原理和工作方式都是相同的，我们所有对半导体器件和应用电力电子线路的研究，都是要使其尽可能的工作在低损耗状态。也就是说应使器件工作在开关状态。这是因为器件工作在开关状态时，其工作状态是最佳的，通态损耗是最小的。

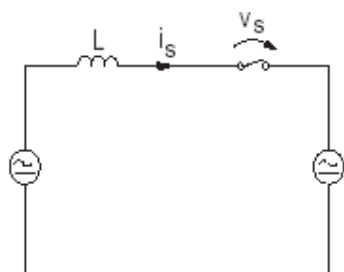
大家知道，当一个器件在开关状态时，它具有这样的特性：

—导通状态： $V=0$ ， $-\infty < i < \infty$ 。

—关断状态： $i=0$ ， $-\infty < V < \infty$ 。

功率半导体器件虽然同是工作在开关状态，当其使用状态不同时，他们表现出不同的特性。

当晶闸管和电感一起组成一个回路时，开关可以主动地开通。也就是说，它能够在任一时刻开通。当开通时间趋进于零时，开关中不出现损耗，这主要是因为回路电感能够立即吸收所出现的电压差。



导通状态： $v_s=0$ ； $-\infty < i_s < \infty$ ；

关断状态： $i_s=0$ ； $-\infty < v_s < \infty$ ；

开关特性：当 $|v_s| > 0$ 时，主动开通；

当 $i_s=0$ ，被动关断

2. 功率半导体器件基本工作原理

功率半导体器件它包括非常多的品种和类别，在这里我们主要介绍晶闸管的结构和工作原理。

晶闸管是具有 PNP 结构的半导体器件，见图 1-1。在阳极 P 区和阴极 N 区之间施加正向电压时，它具有阻断和导通两个稳定的工作状态。由图 1-2 所示的电流—电压特性曲线可以看出，它有一个阻断区和一个导通区。这一特性可以用于电流的接通和关断。

为了使晶闸管由阻断状态变为动态状态，必须使其电流增加到超过某个阈值。要实现这个目标，通常我们有两种途径，其一，使用脉冲电流使其通过门极而加于两个中间区的一个来实现。其二，不断的提高阳极电压，使其超过转折电压（UBO）。

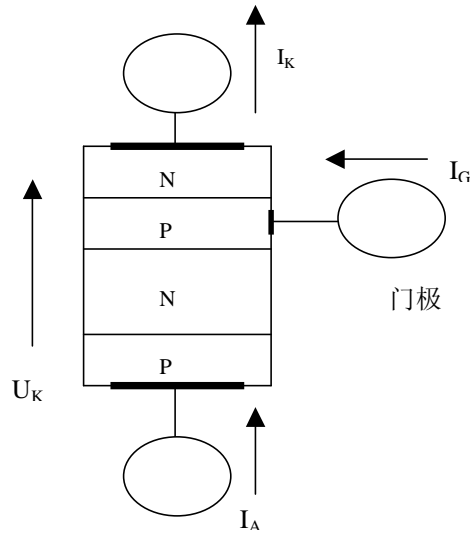


图 1-1

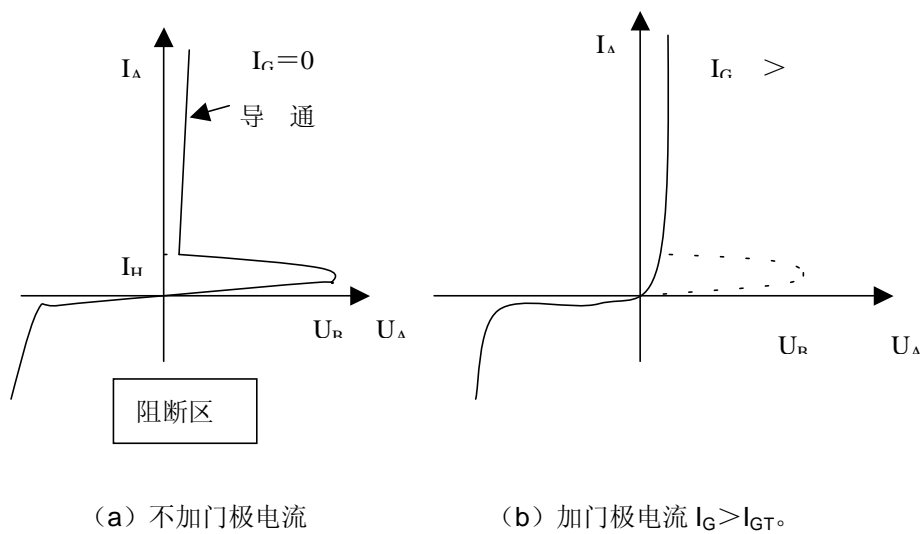


图 1-2 晶闸管的电流—电压特性

I_H —维持电流, I_{GT} —触发电流, U_{B0} —转折电压

一旦晶闸管被开通或被“触发”，其特性就相当于一个二极管，如图 1-2 (b) 所示。此时，在正向它可以通过的电流密度达每平方厘米几百安培，且压降不超过 1~2V。在反向则与此相反，它见处于阻断状态。因此我们用一个带有门极引线的二极管来表示晶闸管，它表明晶闸管是一个可以控制的二极管。

在对晶闸管的工作原理进行描述之前，我们用一个例子先简要介绍一下如何利用晶闸管的开关特性。

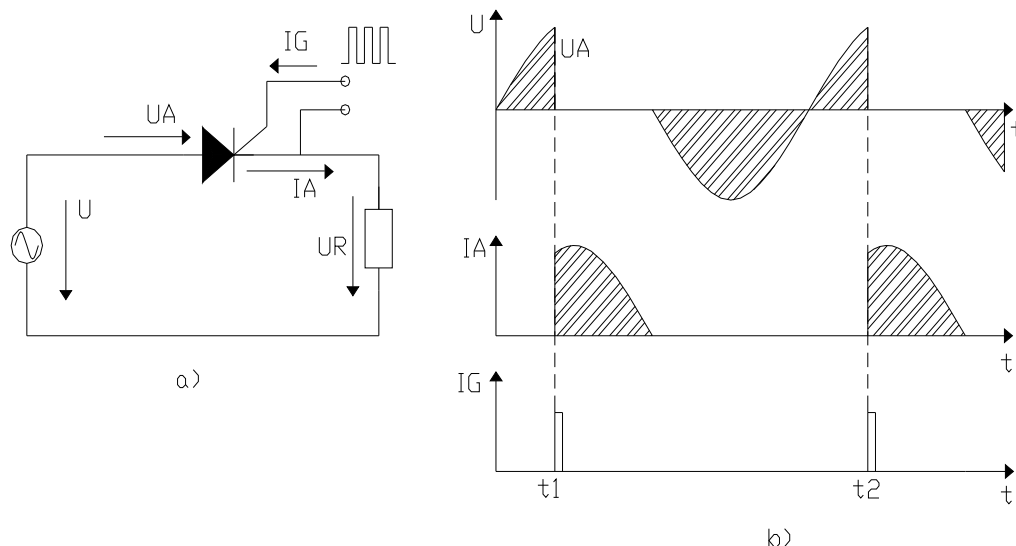


图 1-3 控制交流回路负载功率的晶闸管电路

图 1-3 表示一个交流电路中有一个晶闸管与电阻性负载相串联的电路，其中电源电压 U 小于晶闸管正反向阻断电压。在没有门极信号时，晶闸管时阻断的，从图 1-3 我们清楚的看出， t_1 时刻以前的电流一直为零。在此时刻我们对晶闸管施加门极电流 I_G ，晶闸管被触发。电路中电流迅速上升到 $i=U/R$ 。这一个电流一直维持到正半周快要结束，当电路中电流下降到维持电流 I_H 以下时，电路中电流中断，晶闸管恢复阻断。

在电源电压的负半周，晶闸管一直是阻断的($i=0$)。如果我们在随后的正半周的 t_2 时刻触发晶闸管，则电路中电流又重新流通。

在这个晶闸管的应用电路中，我们可以通过对触发时间的选择，连续调节负载电阻上的平均功率，使其满足我们的要求。

在这里的 t_1 时刻所使用的门极电流可以是一个窄脉冲（电阻负载工况），但脉冲宽度应足以使晶闸管变为导通状态（大于擎住电流）。一旦晶闸管进入导通状态则其门极脉冲失去作用。

2.1. 晶闸管工作原理

为了了解晶闸管中开关的物理过程，我们采用由两只晶体管组成的等效模型来代替晶闸管的 PNP 结构。这是因为这个等效模型能相当完美地解释晶闸管的重要特性和推导典型的规律。并且它还可以比较简单的概括物理过程的优点。下面将晶闸管的作用原理用这个模型来解释。

2.1.1. 晶闸管等效模型

这个模型可用下列方法得到，设想按照图 1-4a，沿虚线把晶闸管的两个基区剪开随后用导线互相连接起来，如图 1-4b 所示。在这个图中，去掉由基区上分开的靠外的 P 和 N 层区域，因为现在它对电流没有放大作用，这样就可以得到图 1-4c 所示的等效模型。它由一个 PNP 晶体管和一个 NPN 晶体管组成，并按上述方式互相连接起来。

在晶闸管的导通方向，正电压加于上面的 P 区即阳极上，两边的 PN 结 J1 和 J3 处于正向，因为此处 P 区相对于 P 区都是正的；如此相反，中间的 PN 结 J2 结则处于反向。

由于处于正向，J₁ 结和 J₃ 结向邻近的基区注入少数载流子，起着发射极的作用，而处于反向偏置的 J₂ 结则起着集电极的作用。所以，在等效模型中，一个晶体管的集电极总是和另一个晶体管的基区连在一起的。

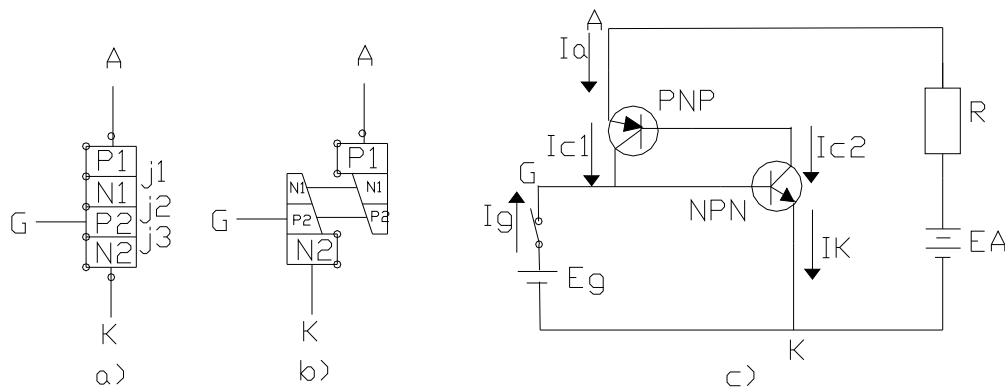


图 1-4 晶闸管等效模型的分解方法

2.1.2. 开通条件

首先我们来讨论这两个晶体管在满足怎样的条件下才能使晶闸管导通。晶闸管是一种四层三端器件，它有 J₁，J₂，J₃ 三个 PN 结，如图 1-4 所示。前已述及，当晶闸管承受正向电压时，为使晶闸管导通，必须使承受反向电压的 PN 结 J₂ 失去阻断作用。图 1-4c 清楚的表明：每个晶体管的集电极电流同时就是另一个晶体管的基极电流。因此两个互相复合的晶体管电路，当有足够的门极电流 I_g 流入时就会形成强烈的正反馈，造成两晶体管饱和导通，即晶闸管饱和导通。

设 PNP 管和 NPN 管的集电极电流相应为 I_{c1} 和 I_{c2}，发射极电流相应为 I_a 和 I_k，电流放大系数为 $\alpha_1 = I_{c1} / I_a$ ， $\alpha_2 = I_{c2} / I_k$ ，并设 J 流过 J₂ 结的反向漏电流为 I_{c0}。

晶闸管的阳极电流等于两管的集电极电流和漏电流的总和：

$$I_a = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} \quad (1-1)$$

$$\text{或 } I_a = \alpha_1 I_a + \alpha_2 I_k + I_{CO} \quad (1-2)$$

若门极电流为 I_g ，则晶闸管的阴极电流为：

$$I_k = I_a + I_g \quad (1-3)$$

从式 (1-2) 和 (1-3)，我们可以得出晶闸管的阴极电流为：

$$I_a = (I_{CO} + I_g \alpha_2) / (1 - (\alpha_1 + \alpha_2)) \quad (1-4)$$

硅 PNP 管和 NPN 管相应的电流放大系数 α_1 和 α_2 随其发射极电流改变而急剧变化，器件关系如图 1-5 所示。

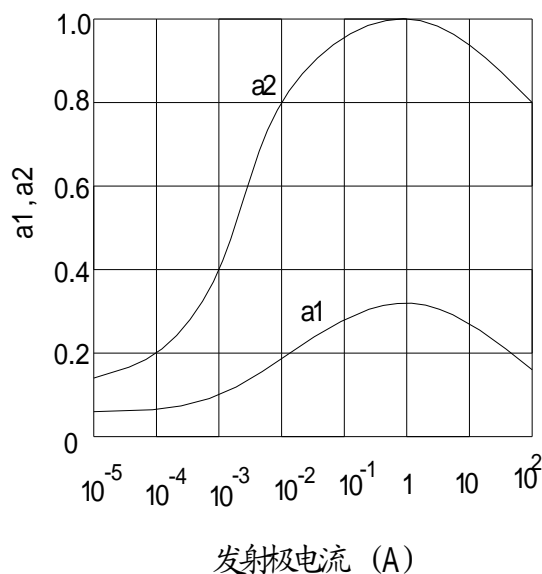


图 1-5 两个晶体管的电流放大系数与发射极电流的关系

当晶闸管承受正向阳极电压，而门极未受电压的情况下，式 (1-4) 中 $I_g=0$ ， $(\alpha_1 + \alpha_2)$ 很小，故晶闸管的阳极电流 $I_a \approx I_{CO}$ 。晶闸管处于正向阻断状态。

当晶闸管承受正向阳极电压下，从门极 G 流入电流 I_g ，由于足够大的 I_g 流经 NPN 的发射结，从而提高其电流放大系数 α_2 ，产生足够大的集电极电流 I_{C2} 流过 PNP 管的发射结，并提高了 PNP 管的电流放大系数 α_1 ，产生更大的集电极电流 I_{C1} 流经 NPN 管的发射结。这样强烈的正反馈过程迅速进行。从图 1-5 可见，当 $(\alpha_1$ 和 α_2 随发射极电流增加而 $(\alpha_1 + \alpha_2) \approx 1$ 时，式 (1-4) 的分母 $1 - (\alpha_1 + \alpha_2) \approx 0$ ，因此大大地提高了晶闸管的阳极电流 I_a 。这时，流过晶闸管的电流完全由主回路的电源电压和回路电阻所决定。晶闸管已处于正向导通状态。

从式 (1-4) 可见，在晶闸管导通后， $1 - (\alpha_1 + \alpha_2) \approx 0$ ，即使此时门极电流 $I_g=0$ ，晶闸管仍能保持原来的阳极电流 I_a 而继续导通。晶闸管在导通后，其门极已失去作用。

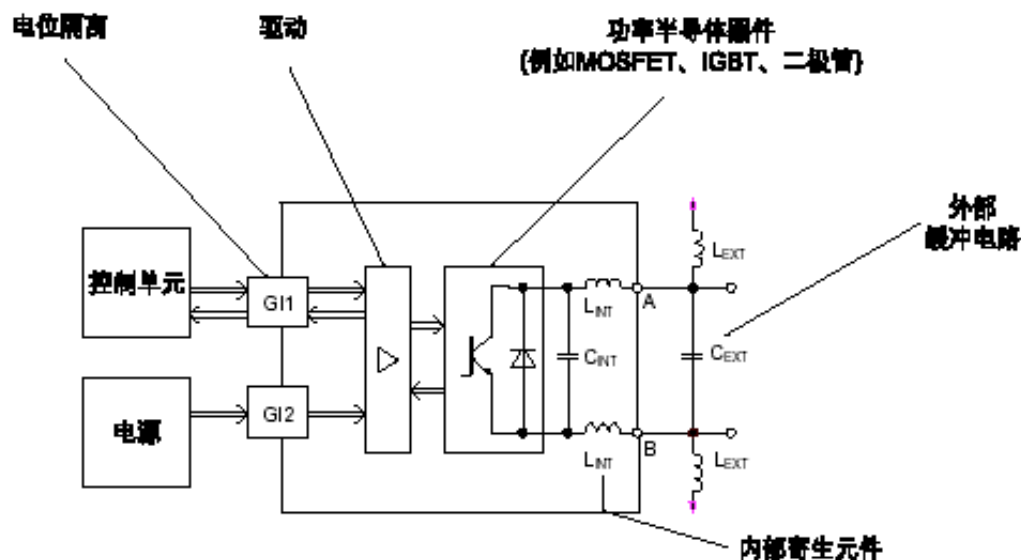
在晶闸管导通后, 如果不断的减小电源电压或增大回路电阻, 使阳极电流 I_a 减小到维持电流 I_H (约数十毫安) 以下时, 由于 α_1 、 α_2 迅速下降, 从 (1-4) 式我们可知: 当 $1 - (\alpha_1 + \alpha_2) \approx 1$ 时, 晶闸管恢复阻断状态。

这就是晶闸管的开关过程。

3. 电力电子开关

电力电子器件和它的控制电路一起共同组成一个电力电子开关。但它们内部之间各功能的联系和相互影响则决定了她的开关特性

图 1-6 显示了一个完整的电力电子开关系统。系统与外部电路及控制系统之间的接口也一并示于图中。通常我们对电位的隔离多采用光耦或感性变换器耐实现。



3.1. 电力电子开关的基本类型

我们可以认为, 电力电子开关的工作模式决定了其所在电路的特性, 从这一点出发, 我们将电力电子开关做如下的基本分类。但这些图中的电流和电压的方向可以根据实际的电路来确定。

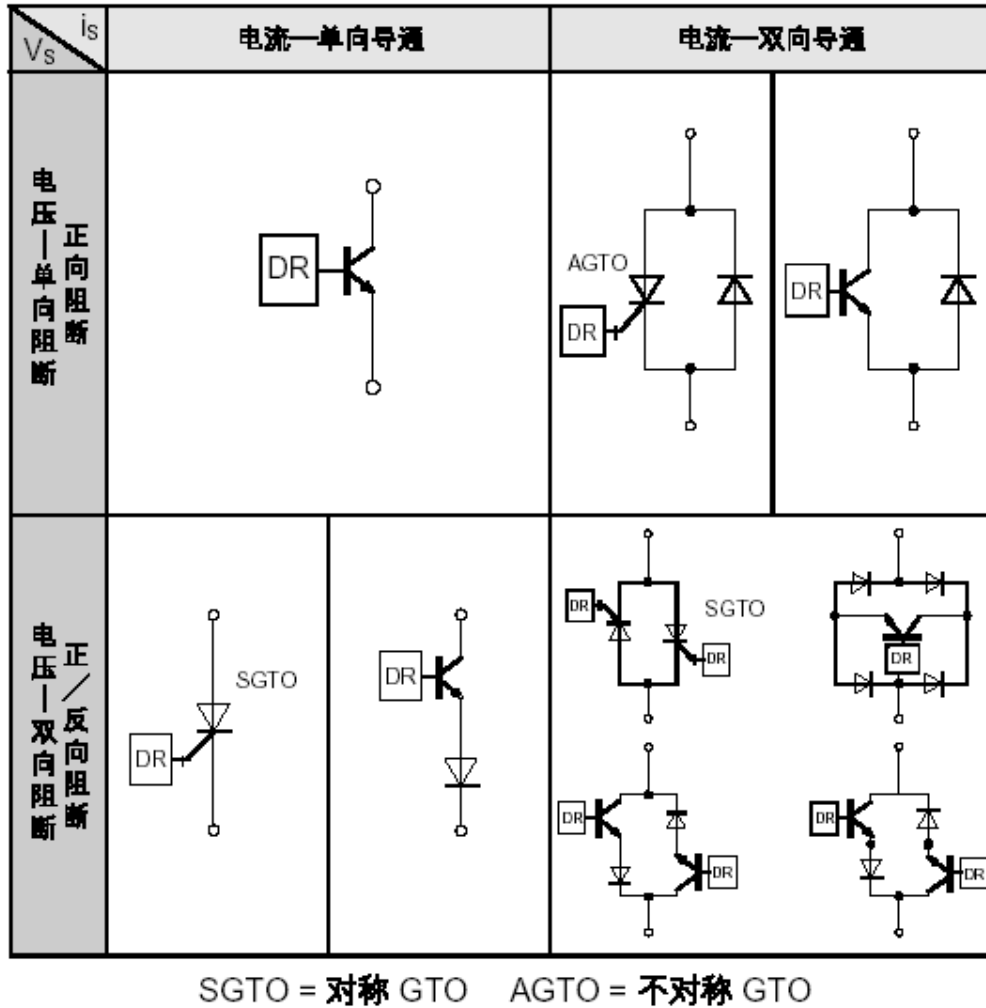


图 1-7 电力电子开关基本电路

4. 晶闸管的特性

通过上面的讨论，我们知道晶闸管它相当于一个在阳极电压为正时可以控制的单向导电开关，对广大的使用者来说，我们最关心的是：在阻断状态下能够承受的最大峰值电压是多少？在正向导通时能够通过多大的电流？导通时其峰值通态电压有多大？门极需要加多大的触发电压和触发电流才能使其可靠导通？下面我们对其进行一个简单的讨论。