



西安交通大学  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

## 电力电子技术研讨课 1 报告

组员： 电气 96 班 梁峰 2194510950  
电气 96 班 任学东 2196113459  
电气 96 班 周泓毅 2196113435

时间：2021 年 10 月 11 日

# 目录

一、生活中的电力电子设备：基于电力电子器件的节能灯	2
1.1 电子节能灯定义	2
1.2 设备简介	2
1.3 器件电路图分析	2
1.4 电路功能分析	4
1.5 涉及电力电子器件的主要参数	6
二、IGBT 仿真特性及比较（IGBT-IKW08T120）	7
2.1 输出特性	7
2.2 转移特性	8
2.3 反向二极管的正向特性	9
2.4 开关波形	11
三、总结	12

# 一、生活中的电力电子设备：基于电力电子器件的节能灯

## 1.1 电子节能灯定义

电子节能灯也叫 LED 节能灯，也叫半导体节能灯，是一种新光源，显色指数达 90 以上，光效 100 流明/瓦，色温 4000-6000K。优点寿命长（大于 50000 小时），节能 80%，环保（无紫外线 频闪 无重金属），显色性好，是当今世界上最新的光源。

## 1.2 设备简介

电子节能灯作为新一代的电照明设备，具有节电、明亮、易启动、无频闪、功率因数高、电源电压范围宽等突出优点，得到越来越广泛的应用。

电子节能灯由节能荧光灯管和高效电子镇流器两部分组成。节能荧光灯管采用三基色荧光粉制造，发光效率大大提高，是白炽灯的 5~6 倍，比普通荧光灯提高 40% 左右。高效电子镇流器采用开关电源技术和谐振启辉技术，工作频率 40~60kHz，不仅效率和功率因数进一步提高，而且彻底消除了普通荧光灯的频闪和“嗡嗡”噪声，对保护眼睛也极为有利。



从灯泡上的标注可以读出以下参数：

功率等级：65W

输入：AC 220V 50Hz

电流： $I=492\text{mA}$

型号：YPZ 220/65-S

图 1-1 灯泡实物图与参数

## 1.3 器件电路图分析

### 1.3.1 实物图

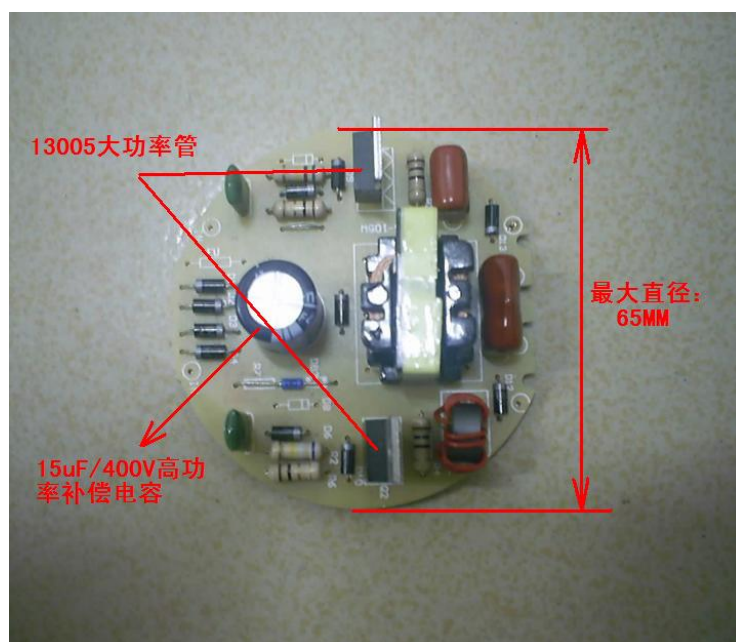


图 1- 2 电子节能灯实物电路图

电子节能灯的实物电路部分如图所示。可以清晰地看出电路中包含两个电力晶体管 asi3005 和多个二极管，电容，变压器以及电阻等器件。

### 1. 3. 2 内部原理图

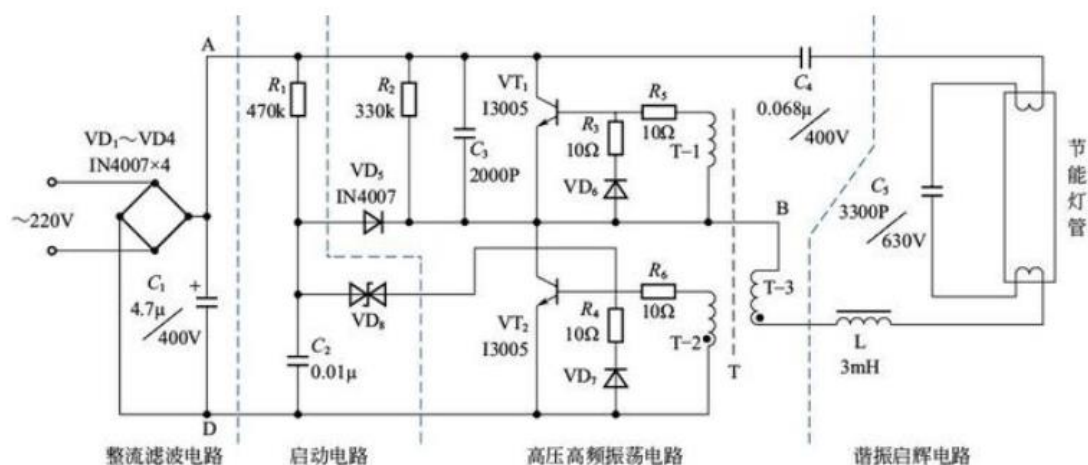


图 1- 3 电子节能灯原理电路图

电子节能灯的内部电路原理如图所示。除节能灯管以外的电路，习惯上称为电子镇流器。电子镇流器的作用，是将 50Hz 交流 220V 市电变换为 50kHz 高频交流电，再去点亮节能灯管。

电路主要包括：

①整流二极管 VD 1 ~VD 4 和滤波电容器 C 1 组成的整流滤波电路，其功能是将交流市电转变为直流电。

②晶体管 VT 1 、VT 2 和高压变压器 T 等组成的高压高频振荡电路，其功能是产生高频交流电。

③电阻 R 1 、电容 C 2 和双向二极管 VD 8 等组成的启动电路，其功能是在刚接

通电源时启动振荡电路。

④电容 C 5 、电感 L 等组成的谐振启辉电路，其功能是产生节能灯管所需要的启辉高压。

## 1.4 电路功能分析

### 1.4.1 功能概述

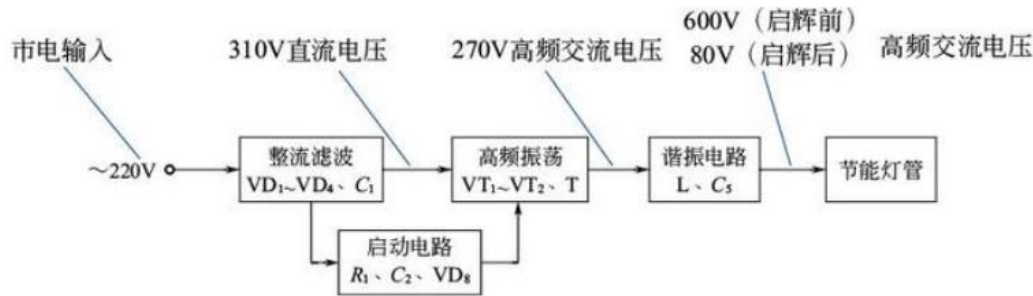


图 1-4 电路图功能说明

图中流程图给出了电路工作的共能。结合图 3 分析可知图中整流电路和启动电路为控制电路，高压高频电路为驱动电路，带有节能灯管的谐振启辉电路为其主电路。

电路工作原理是，50Hz 的交流 220V 市电直接经 VD 1 ~VD 4 桥式整流、C 1 滤波后，输出约 310V 的直流电压(空载时)，作为高频振荡器的工作电源。在刚接通电源时，由 R 1 、C 2 、VD 8 组成的启动电路使自激振荡器起振。

功率开关管 VT 1 、VT 2 和高频变压器 T 等组成开关式自激振荡器，将 310V 直流电压变换为 50kHz、约 270V 的高频交流电压，作为节能灯管的工作电压。C 5 和 L 组成串联谐振电路，使节能灯管启辉点亮。

### 1.4.2 具体功能分析

#### (1) 市电直接整流电路

高频振荡器所需要的直流工作电源，直接由交流 220V 市电整流获得，彻底摒弃了电源变压器，因此电源效率大为提高，设备体积大为缩小。

交流 220V 电源不经过电源变压器而直接由整流二极管 VD 1 ~VD 4 桥式整流，再经滤波电容器 C 1 滤除交流成分后，即可输出+310V(空载时)的直流电压。

#### (2) 高压高频振荡电路

高压高频振荡器是电子节能灯的核心电路，它由振荡电路和启动电路组成。

##### ①振荡电路

功率开关管 VT 1 、VT 2 和高频变压器 T 等组成开关式自激振荡器，为节能灯管提供高压高频交流电压。

接通电源后，VT 2 在启动电路的触发下导通，此时+310V 直流电压经 C 4 、灯管上端灯丝、C 5、灯管下端灯丝、L-3、VT 2 的集电极-发射极形成回路，对谐振电容 C 5 充电，充电电流 I 充 如图 2-60 中点划线所示，C 5 上电压为上正下负。

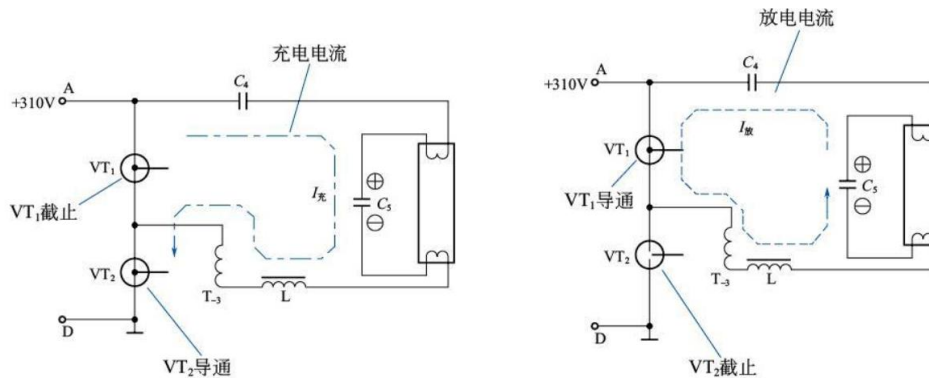


图 1-5 振荡电路原理说明

由于高频变压器 T 各绕组的耦合作用, VT 2 很快由导通变为截止, VT 1 则由截止变为导通, 此时谐振电容 C 5 通过灯管上端灯丝、C 4、VT 1 的集电极-发射极、T-3、L、灯管下端灯丝放电, 放电电流  $I_{放}$  如图中虚线所示。

同样由于高频变压器 T 各绕组的耦合作用, VT 1 很快也由导通变为截止, VT 2 则又由截止变为导通, 如此周而复始, VT 1、VT 2 交替导通形成振荡, 其振荡频率取决于 C 5、L 串联谐振电路, 约为 50kHz。

电容 C 4 的作用是隔直流通交流, 阻止+310V 的直流电压直接进入节能灯管, 允许 50kHz 的高频交流电压通过。R 3、VD 6 和 R 4、VD 7 分别接在 VT 1 和 VT 2 基极回路, 为 T -1 和 T -2 提供负半周时的泄放通道。

## ②启动电路

由于功率开关管 VT 1、VT 2 的基极偏置电压均取自高频变压器 T 的振荡反馈电压, 电路未起振时两管均因无基极偏置电压而截止, 因此在刚接通电源时必须由启动电路使电路起振。

如图所示, 接通电源后, +310V 直流电压开始经 R 1 对 C 2 充电, 当 C 2 上电压上升到双向二极管 VD 8 的阈值时, VD 8 导通, 向 VT 2 基极提供偏置电压使其导通, 引起振荡。VT 2 导通后, 通过 VD 5 将 C 2 上已充的电压放掉, 不影响电路正常振荡。

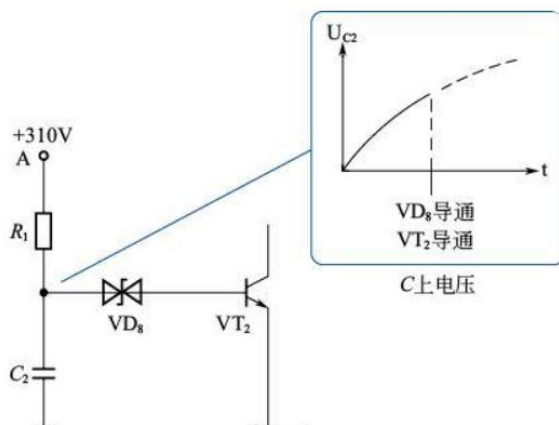


图 1-6 启动电路原理说明

## (3) 谐振启辉电路

节能灯管的工作原理要求必须首先有一个高电压作用于其两端使其启辉, 然后再将电压降低维持点亮即可。在普通铁芯镇流器荧光灯中, 由辉光启动器完成

这一任务。在电子节能灯中，则采用了谐振启辉电路，其工作原理如图所示。

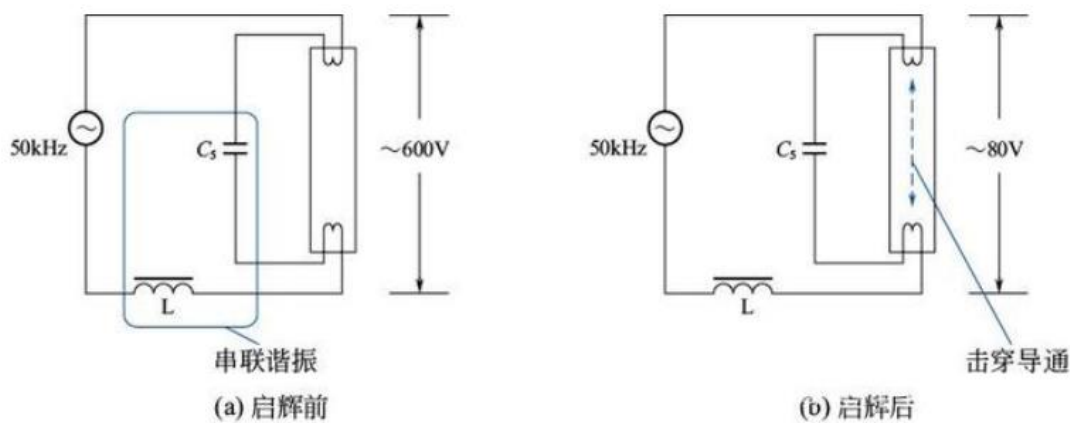


图 1- 7 启辉电路工作原理

高压高频振荡器提供的 50kHz、约 270V 的交流电压，加在  $C_5$ 、 $L$  串联谐振回路两端并产生谐振，于是在谐振电容  $C_5$  两端即产生一个  $Q$  倍于回路电压的高电压(约 600V)。节能灯管并联于谐振电容  $C_5$  两端， $C_5$  两端的电压即为节能灯管的工作电压。串联谐振时  $C_5$  两端的 600V 高压将节能灯管内的气体击穿而使其启辉。

当节能灯管点亮后，其内阻急剧下降，该内阻并联于  $C_5$  两端，使  $C_5$ 、 $L$  串联谐振电路  $Q$  值大大下降，故  $C_5$  两端(即灯管两端)的高启辉电压(约 600V)即下降为正常的工作电压(约 80V)，维持节能灯管稳定地正常发光。

1.5 涉及电力电子器件的主要参数

符号	说明	单位
$V_F$	最大正向电压	V
$V_P$	最大重复峰值反向电压	V
$I_{OM}$	最大输出电流	A
$h_{FE}$	共 E 级直流放大倍数	1
$T_J$	工作温度	°C

型号	$V_F$	$V_P$	$I_{OM}$	$h_{FE}$	$T_J$
IN4007	1.1	1000	1		-55°C to 150°C
I3005	1.1	1000	0.7	300	-65°C to 200°C



## 二、IGBT 仿真特性及比较（IGBT-IKW08T120）

### 2.1 输出特性

#### 2.1.1 软件仿真

仿真电路图如下图所示，设置 VCE 从 0V 至 7V，每次间隔 0.01V；设置 VGE 从 7V 至 17V，每次间隔 2V。设置 R1=0.1Ω，TJ=25。

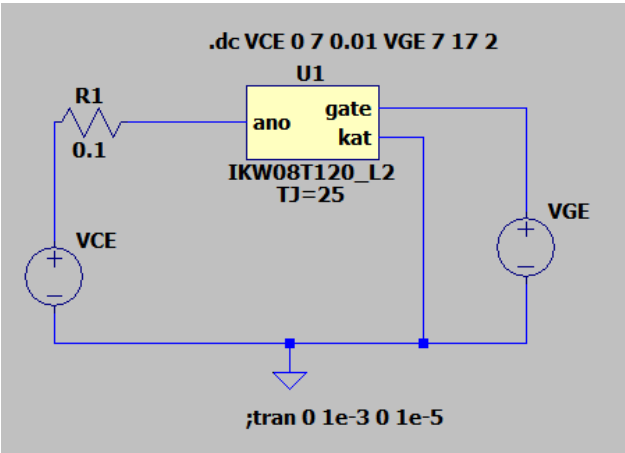


图 2-1 输出特性仿真电路图

#### 2.1.2 结果对比分析

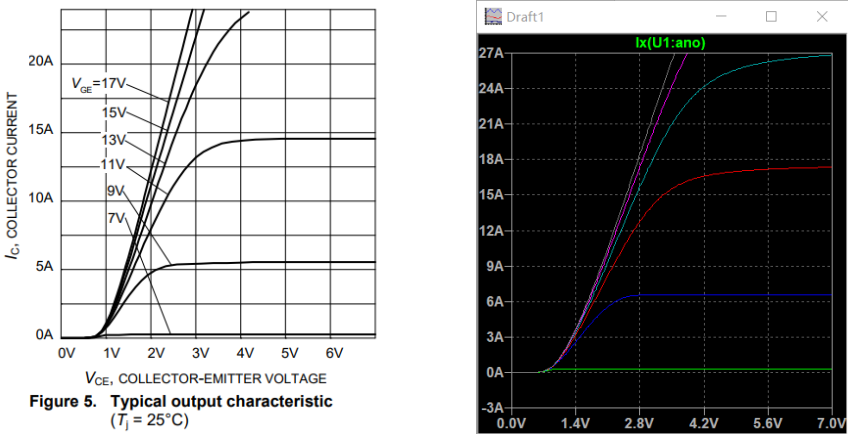


图 2-2 输出特性仿真结果比对

输出特性描述的是集电极电流与集射电压的关系。

当栅射电压低于开启电压时，导电沟道尚未形成，管子处于截止状态， $I_c=0$ ；当栅射电压继续增大，导电沟道还没有出现预夹断，曲线斜率随电压增大而减小，管子处于可变电阻区；当电压增大到出现预夹断，此时栅射电压对  $I_c$  影响不大，曲线逐渐变为水平，此时管子处于放大区。

右图中绿色 7V 曲线，其电流不随电压变化且始终为 0，说明处于截止区；蓝色 9V 曲线先进入可变电阻区再进入饱和区，说明此 IGBT 开启电压介于 7V 与 9V 之间。从图中可以看出栅射电压越大，达到饱和区所需的集射电压就越大。

对比手册图形与仿真图形发现，二者的变化趋势几乎相同，只是到达饱和时的电压电流不同，可能原因有电阻值的选择不同和实际 IGBT 温度很难准确控制在 25 度。



## 2.2 转移特性

### 2.2.1 软件仿真

仿真电路图如下图所示，设置 VCE 为 20V，设置 VGE 从 0V 至 14V，每次间隔 0.1V。  
方法一分别设置两次 TJ 值为 25 和 150，方法二用 .temp 命令设置温度为 25 和 150。

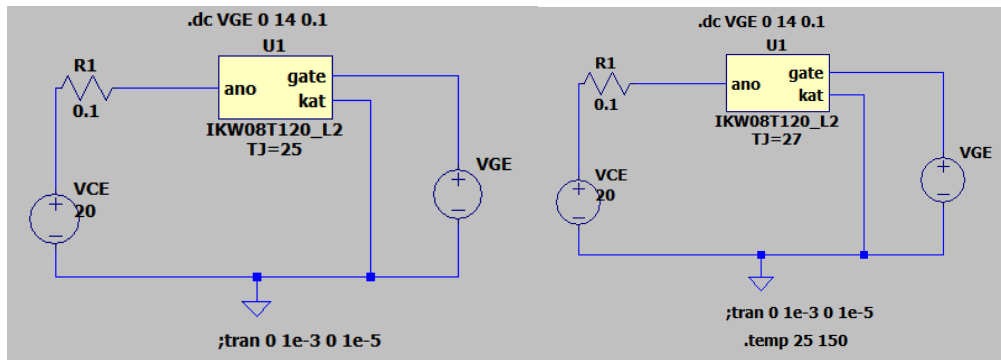


图 2-3 转移特性仿真电路图

### 2.2.2 结果对比分析

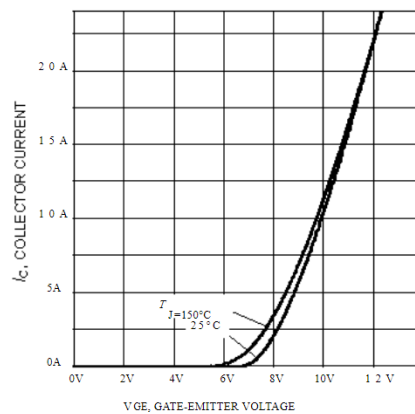


Figure 7. Typical transfer characteristic  
( $V_{CE}=20\text{V}$ )

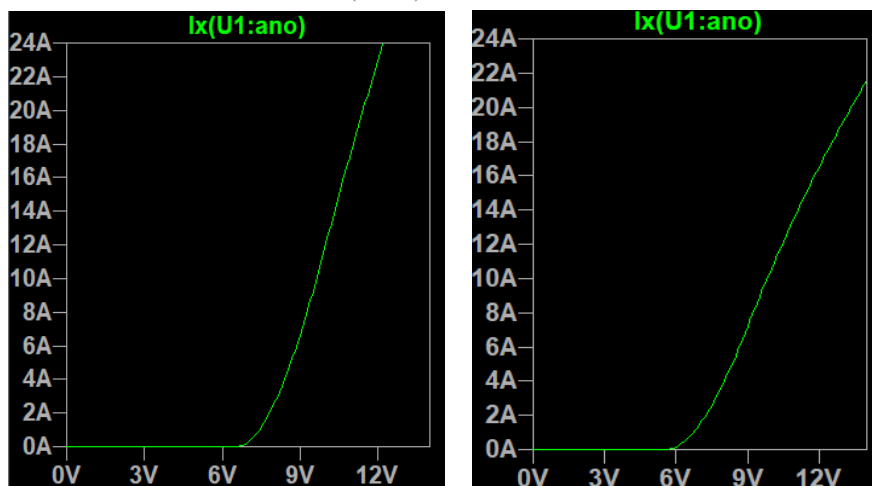




图 2-4 转移特性仿真结果对比

转移特性描述的是集电极电流与栅射电压的关系。

当栅射电压低于开启电压时，IGBT 未导通，故集电极电流为 0；当电压高于开启电压时，电流随电压增大而增大。开启电压随着温度升高而降低，在上图中也可以明显看到 25 度的开启电压高于 150 度的，且发现温度越高的器件电导越低。

对比方法一和方法二得出的仿真图形发现两种方法得出的曲线基本相同，再对比手册图形与仿真图形时发现二者在低电压时符合的较好，但在高电压时差别较大。手册图形中两条曲线相交后便以几乎相同的电导上升，但仿真结果显示两条直线相交后，25 度曲线的斜率仍明显高于 150 度曲线。

## 2.3 反向二极管的正向特性

### 2.3.1 软件仿真

仿真电路图如下图所示，将两电源反接，设置 VGE 为 10V，设置 VCE 从 0V 至 3V，每次间隔 0.05V。方法一分别设置两次 TJ 值为 25 和 150，方法二用 .temp 命令设置温度为 25 和 150。

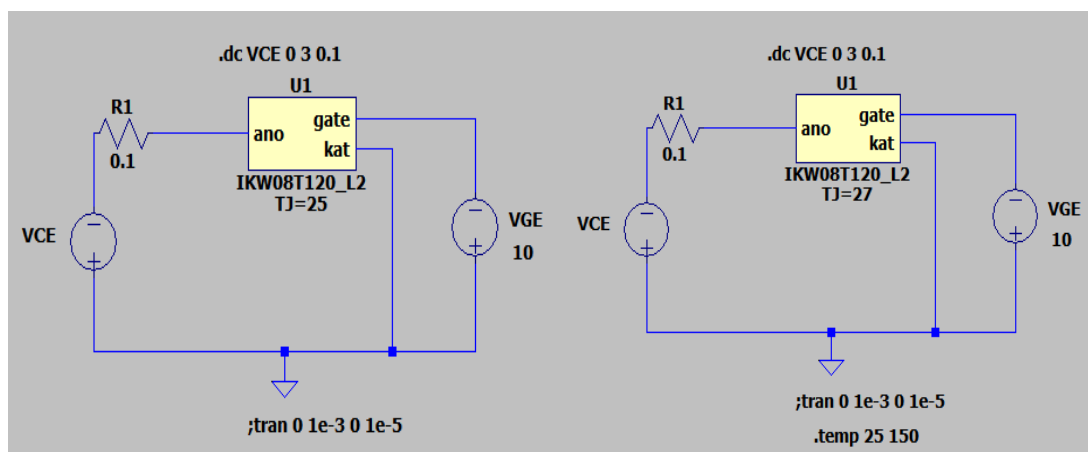


图 2-5 正向特性仿真电路图

### 2.3.2 结果对比分析

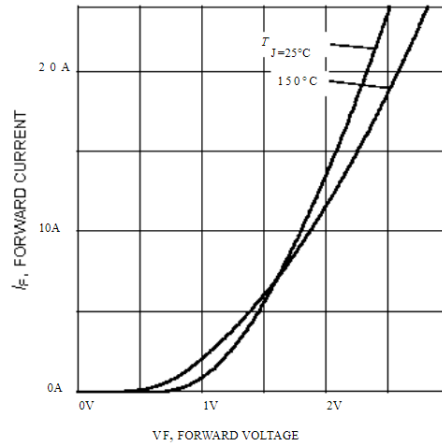


Figure 27. Typical diode forward current as a function of forward voltage

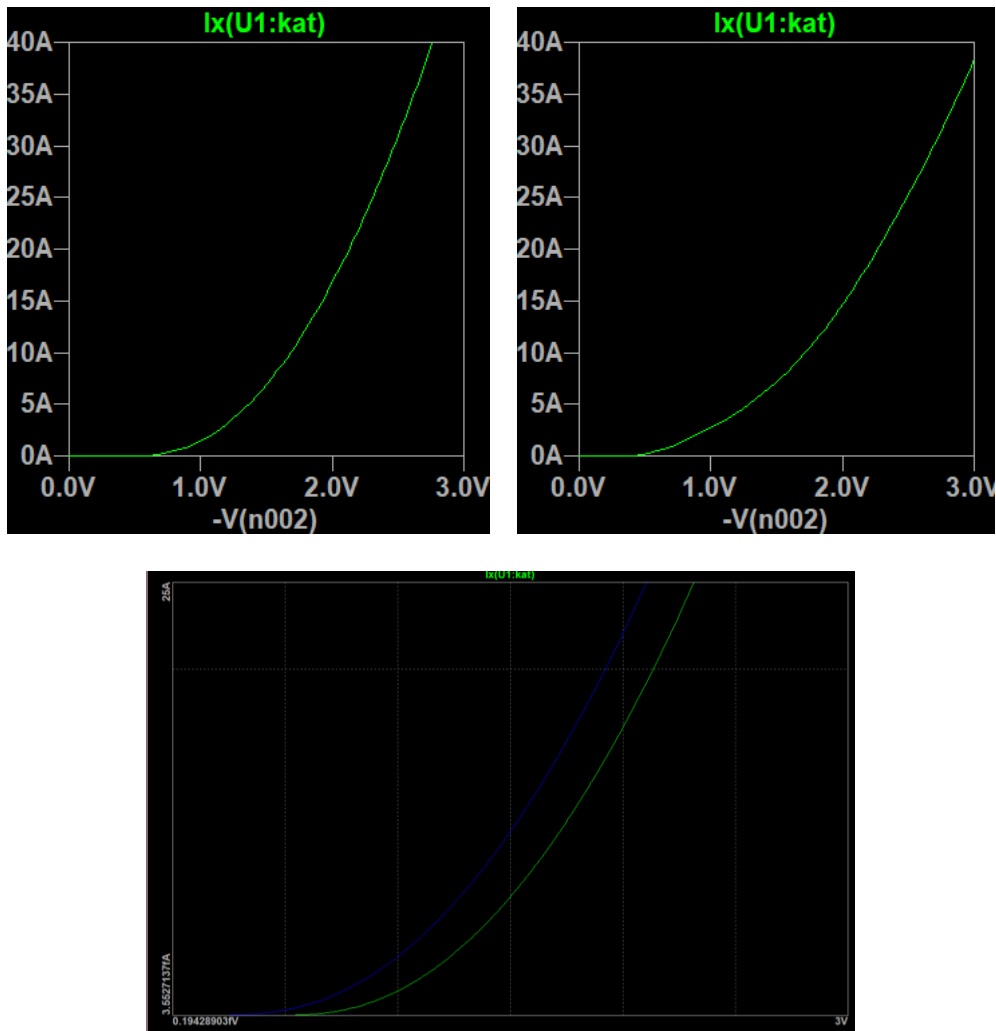


图 2-6 正向特性仿真结果比对

IGBT 集射极之间有一个反向二极管，当器件正常工作时该二极管不起作用，当给栅极加反向电压使 IGBT 关闭然后给集电极接反向电压就可以使二极管导通从而测出二极管电流与二极管电压之间的关系。

由 150 度的曲线比 25 度的曲线起步更早得出二极管导通电压随温度的增大而降低。根

据手册图形得出随着电压的增大，二极管的等效电导逐渐增大，且温度越高电导越小。

比较方法一与方法二得出的图形，发现二者有明显的差异，方法二中两条曲线无交点，且电导大小与温度几乎无关。方法一得出的图形与手册图形几乎相同，因此在该实验中应用直接设置 TJ 值的方式仿真。经过查资料认为设置 TJ 相当于设置 pn 结的结温，用 .temp 相当于设置环境温度，二者还是存在微小差异。

## 2.4 开关波形

### 2.4.1 软件仿真

仿真电路图如下图所示，三个极分别接  $2\Omega$  电阻，VCE 为 10V，VGE 为峰值为 14V 的脉冲电源。

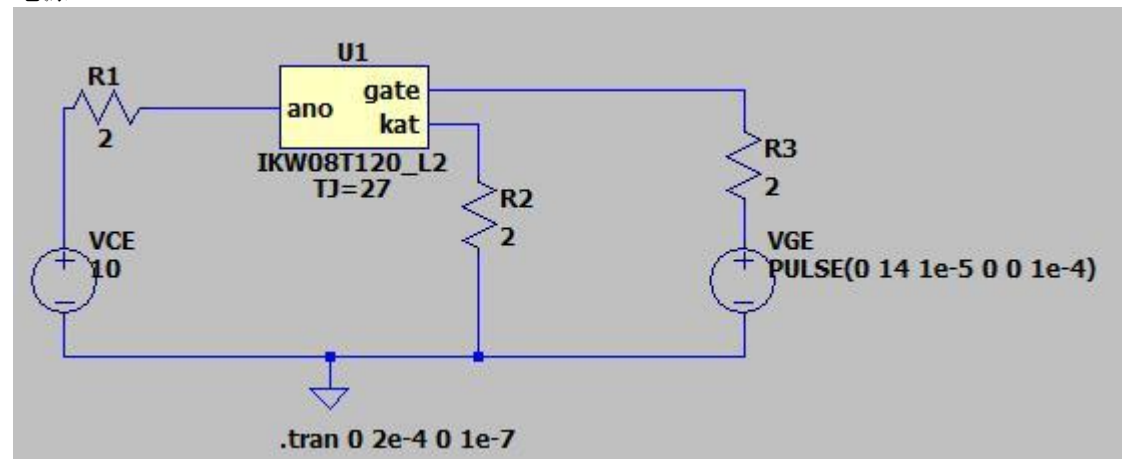
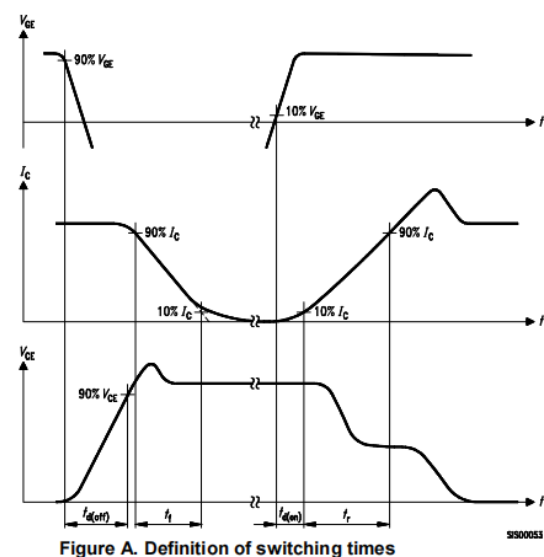
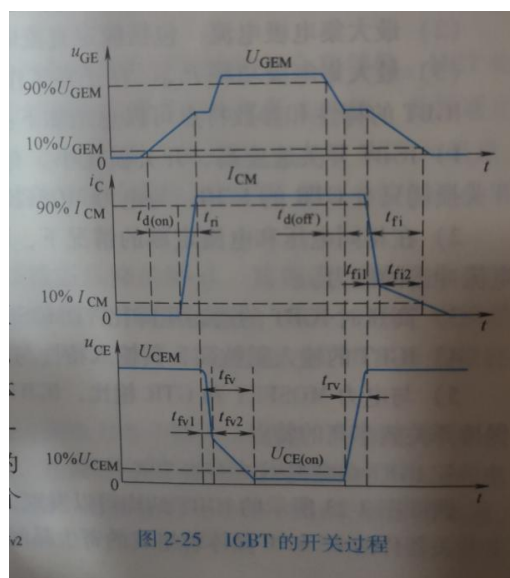


图 2-7 开关波形仿真电路图

### 2.4.2 结果对比分析



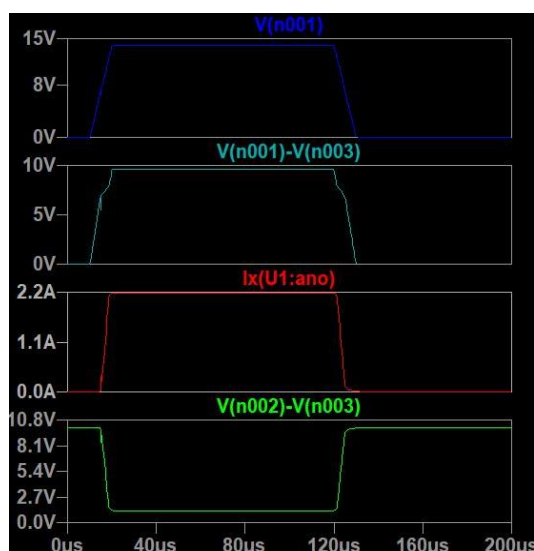


图 2-8 开关波形仿真结果分析

$V(n001)-V(n003)=V_{GE}$ ,  $V(n002)-V(n003)=V_{CE}$

当射极电压下降时,连接在栅极和射极之间的极间电容会反向充电,使得栅极电压维持不变,处于密勒平台上。书上给出的曲线有明显的密勒平台,但仿真结果中只是上升沿与下降沿中间出现一段弧线,与理论结果略为接近。

在电流曲线下下降沿的后段,由于 MOS 管已经关断,IGBT 又无反向电压,所以 N 区少子复合缓慢,使得电流下降较为缓慢,称为拖尾电流。书上所给图形有明显拖尾电流,但仿真结果在电流接近 0 时才出现。

当集射极电压下降时, MOS 管栅漏电容增大,且 IGBT 中晶体管饱和需要时间,因此下降沿后段会下降缓慢。书上给出曲线有明显变化,但仿真结果却无变化,说明仿真结果不够准确。

观察数据手册给出的图形发现无密勒平面和拖尾电流,并且波形升降均与书上描述不同,这可能是外电路连接不同造成的,手册里未给出电路图,所以仿真使用书上所给电路图,结果也与书中所给更为相近。施加的脉冲信号的峰值与作用时间也会影响曲线形状。

### 三、总结

通过这次研讨课我们对节能电子灯这一生活中常见的电力电子设备进行了研究,通过分析讨论研究了这一设备的功能,并深入分析了该设备的工作原理,对功率等级、驱动电路、控制电路这三个概念有了更为深入的理解,也对该电路中出现的电力电子器件的特性有了认识和了解。

此外我们通过 LTspice 这一软件对 IGBT-IKW08T120 的输出特性、转移特性、反向二极管的正向特性以及开关波形进行了仿真,并于元件手册上的参数与特性进行了对比,通过实践对 IGBT 这一器件的特性有了更为深入的了解和认识,也熟悉了仿真软件的基本操作。

通过这次研讨课对日常生活中电力电子设备的研究以及对仿真软件的操作,我们对电力电子技术这门课的应用和仿真实践有了进一步的学习和了解,为今后的学习打下了良好的基础。