

用于计算机辅助设计的晶闸管模型

李晓明 黄汝激

(电路电子教研室)

摘 要

本文讨论了用于功率电子电路的晶闸管模型的建立方法。给出了一个适用于计算机辅助设计的非线性集中参数的晶闸管等效电路模型。

模型的建立是基于对器件内部载流子运动的物理过程进行模拟,分析了器件的少数载流子注入;空间电荷区内部载流子的产生与复合;雪崩倍增效应;基区宽度调制效应及电荷存贮效应。将反映这些物理过程的数学公式用非线性电路元件表示,组成了由非线性电阻、电容及受控电流源所构成的晶闸管模型。

利用这个模型可以分析晶闸管开关过程的动态非线性特性。

关键词: 晶闸管, 模型, 计算机辅助设计

Thyristor Model for Computer Aided Design

Li Xiaoming Huang Ruji

Abstract

This paper describes the method of constructing the model for thyristor device which used for power electric circuits and presents a nonlinear lumped equivalent circuit model for it.

In modelling of the thyristors, it is based on the analog of the physical process of carriers movement inside the device. The following facts are also analysed:

(1) Injection of minority carriers in device.

(2) Generation and recombination of carriers in space charge region.

(3) The effects due to the avalanche multiplication basewidth modulation, and charge storage.

The mathematical formulas describing these physical process are replaced by corresponding nonlinear elements and an equivalent circuit model for a thyristor is formed which consists of nonlinear resistors, nonlinear capacitors and controlled current sources.

Using this model, it is possible to analyse the dynamic nonlinear characteristics of thyristor's ON-OFF process.

Key words: thyristor, model, computer aided design (CAD)

引 言

用等效电路模拟晶闸管元件, 进行功率电子电路的计算机辅助分析, 从70年代初就被人们所关注。最早的模型是将晶闸管等效成简单的开关, 它仅适于分析由多个晶闸管所组成电路的稳态过程。对于晶闸管状态转换过程进行分析, 开关模型是太粗糙了, 不能反映出瞬态变换过程的重要非线性特性。因此有必要根据器件工作的物理过程, 建立比较精确的模型。对此, 国外已发表一些文献, 但国内则很少。本文参照已有的模型加以改进, 针对国内生产的普通晶闸管器件, 建立了反映晶闸管动态特性的用于计算机辅助设计的模型。

1 晶闸管器件模型的建立

晶闸管是一种PNPN 4层结构的半导体器件, 其工作过程可以用两个晶体3极管互相结合构成的电路进行说明。本文建立的等效电路模型就是参照晶体3极管的扩展Ebers-Moll模型, 对于晶闸管内部少数载流子运动规律进行分析, 得出描述这种物理过程的数学方程式, 然后用非线性电阻、受控电流源, 非线性电容等基本电路元件构成晶闸管的等效电路模型。

在建立模型的过程中, 考虑了空间电荷区的载流子向扩散区的注入, 空间电荷内载流子的产生和复合, 扩散区内的电荷积累, 空间电荷区内存贮电荷的变化。还考虑了晶闸管工作时的基区宽度调制效应, 雪崩倍增效应, 发射区重掺杂, 大注入情况及发射极短路结构对模型参数的影响。在晶闸管模型化时, 使模型参数与器件的物理特性一一对应, 注意到尽可能反映实际特性, 又使模型不过于复杂。下面就论述模型所表示的物理过程及其构成。

图1是表示晶闸管结构及载流子浓度分布的简单示意图。根据此图分析各扩散区内载流子的变化, 进而得到表示各PN结处电流变化的方程。

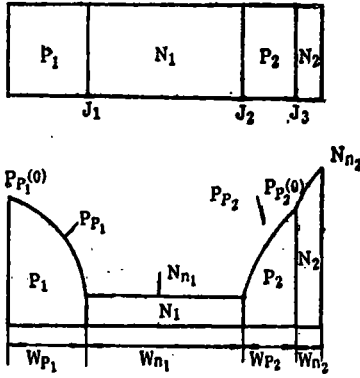


图1 晶闸管载流子浓度分布示意图

Fig. 1 Distribution of thyristor carriers density

1.1 少数载流子的注入

建立模型的方法是先考虑主要因素建立基本模型, 然后讨论各种情况产生的影响。因此在考虑扩散区内少子注入电流时, 首先假设:

(1) 晶闸管是一维的, 3个结是平行平面结;

(2) 忽略势垒区的复合作用, 通过势垒区的电流不变;

(3) 小注入情况, 且P₁和N₂区的长度比少数载流子扩散长度长得多, 从而两端少数载流子密度都等于其平衡值。

根据以上假设和图1所示晶闸管载流子密度分布图, 列出各区的载流子电流密度方程,

并由电流密度方程求出各区少数载流子电流密度。通过PN结的电流是通过空间电荷区

向P区注入的电子电流和向N区注入的空穴电流之和。这样求得了通过3个PN结的电流如下:

$$I_{D1} = I_{S1} (e^{qV_1/kT} - 1) - K_1 I_{S2} (e^{qV_2/kT} - 1) \quad (1)$$

$$I_{D2} = I_{S2} (e^{qV_2/kT} - 1) - K_2 I_{S1} (e^{qV_1/kT} - 1) - K_3 I_{S3} (e^{qV_3/kT} - 1) \quad (2)$$

$$I_{D3} = I_{S3} (e^{qV_3/kT} - 1) - K_4 I_{S2} (e^{qV_2/kT} - 1) \quad (3)$$

其中, $I_{S1} = A_1 q n_i^2 / [\int_{0}^{W_{P1}} (P_{P1}/D_{nP1}) e^{-(W_{P1}-X)/L_{nP1}} dx]$

$$+ A_1 q \cdot D_{Pn1} n_i^2 / [N_{n1} L_{Pn1} \text{th} (W_{n1}/L_{Pn1})] \quad (4)$$

$$I_{S2} = [A_2 q D_{nP2} n_i^2 / P_{P2}(0)] \cdot e^{2W_{P2}/g} [Z_0 \text{cth} Z_0 W_{P2} - 1/g]$$

$$+ A_2 q D_{Pn1} n_i^2 / [N_{n1} L_{Pn1} \text{th} (W_{n1}/L_{Pn1})] \quad (5)$$

$$I_{S3} = [A_3 q D_{nP2} n_i^2 / P_{P2}(0)] [1/g + Z_0 \text{cth} Z_0 W_{P2}] + A_3 q n_i^2 / [\int_{0}^{W_{P2}}$$

$$(N_{n2}/D_{Pn2}) e^{-\Delta E_g/KT} e^{-(W_{n2}-X)/L_{Pn2}} dx] \quad (6)$$

$$K_1 = \{ 1 / [\text{ch} (W_{n1}/L_{Pn1})] \} \cdot 1 / \{ 1 + [D_{nP2} e^{2W_{P2}/g} (Z_0 \text{cth} Z_0 W_{P2} - 1/g) \cdot \text{th} (W_{n1}/L_{Pn1}) \cdot L_{Pn1} \cdot N_{n1} / D_{Pn1} / P_{P2}(0)] \}$$

$$\quad (7)$$

$$K_2 = \{ 1 / [\text{ch} (W_{n1}/L_{Pn1})] \} \cdot 1 / \{ 1 + N_{n1} \cdot L_{Pn1} \cdot \text{th} (W_{n1}/L_{Pn1}) /$$

$$[D_{Pn1} \cdot \int_{0}^{W_{P1}} (P_{P1}/D_{nP1}) e^{-(W_{P1}-X)/L_{nP1}} dx] \} \quad (8)$$

$$K_3 = \{ 1 / [1 + (\eta - 1) / \eta^2 \cdot (W_{P2}/L_{nP2})^2] \} \cdot$$

$$1 / \{ 1 + P_{P2}(0) / [\int_{0}^{W_{n2}} (N_{n2}/D_{Pn2}) e^{-\Delta E_g/KT} \cdot e^{-X/L_{Pn2}} dx]$$

$$/ [1/g + Z_0 \cdot \text{cth} Z_0 W_{P2}] / D_{nP2} \} \quad (9)$$

$$K_4 = \{ 1 / [1 + (e^\eta - \eta - 1) / \eta^2 \cdot (W_{P2}/L_{nP2})^2] \} \cdot$$

$$1 / \{ 1 + D_{P1} \cdot P_{P2}(0) / [D_{nP2} \cdot e^{2W_{P2}/g} (Z_0 \text{cth} Z_0 W_{P2} - 1/g) \cdot L_{Pn1} N_{n1} \text{th} (W_{n1}/L_{Pn1})] \} \quad (10)$$

其中: D_n, D_p 分别表示电子和空穴扩散系数;

μ_n, μ_p 分别表示电子和空穴的漂移系数;

n, p 分别表示电子和空穴浓度;

E表示电场强度。

$$\eta = \ln \{ P_2(0) / P_2(W_{P_2}) \}$$

$$g = W_{P_2} / \eta$$

$$Z_0 = (1/g^2 + 1/L_{nP_2}^2)^{1/2}$$

W_e 为基区的有效宽度。

对于普通元件,从式(4)(5)(6)得出常数代入式(1)(2)(3)即可。式(7)(8)(9)(10)所示乘积项的最后一项也是常数。因此,虽然公式看起来复杂,但是只要将管子结构参数代入,则实现该模型还是比较简单的。

这组方程描述了小注入条件下载流子的扩散方程。(1)(2)(3)式中的PN结电流可分成两部分:一部分PN结电流来源于本PN结电压的作用,这可用非线性电阻—理想二极管来表示;另一部分PN结电流来源于另一PN结电压的作用,这可用受控电流源表示。由此构成了模拟晶闸管中载流子注入和扩散效应的最基本等效电路。

1.2 空间电荷区的复合—产生电流

在前面扩散电流推导中,曾假设电流通过势垒区时保持不变,忽略了空间电荷区的复合—产生电流。而实际上,在元件电流很小时,空间电荷区复合—产生电流可大于扩散电流,从而减小了结之间的相互影响,降低了注入效率。考虑到电流放大系数受电流变化的影响是晶闸管正常工作的一个关键因素,因此在模型中以非理想二极管进行模拟。

$$I_{r,i} = I_{r,i} \cdot (e^{qV_i/2kT} - 1)$$

$$I_{r,i} = A_i \cdot q \cdot x_{m,i} \cdot 0.5n_i / (\tau_n + \tau_p) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (11)$$

其中: $I_{r,i}$ 表示复合—产生电流; A_i 表示结面积,

$x_{m,i}$ 表示空间电荷区宽度; τ_n 、 τ_p 表示电子和空穴的寿命。

1.3 雪崩倍增效应

各PN结的击穿电压决定了晶闸管的阻断能力,由Miller实验给出了雪崩倍增因子的表达式:

$$M = 1 / \{ 1 - (V/V_B)^n \} \quad (12)$$

其中: V_B 为雪崩击穿电压,对于硅 n 取6^[6]。

将雪崩倍增因子作为前面导出的电流方程的一个乘积项,则模型中包含了这一效应的影响。

1.4 基区宽度调制效应

零偏时,空间电荷区的宽度是一定的,因而基区宽度也是一定的,但是当外加电压时,空间电荷区宽度变化要引起基区宽度变化。例如,正向阻断状态,外加电压越高, J_2 结承受的反向电压越大,使空间电荷区展宽,长短基区都变窄,电流放大系数增大了。空间电荷区的宽度可表示为:

$$\text{突变结: } X_m = \{ (2\epsilon\epsilon_0/q) [V(N_A + N_D) / (N_A \cdot N_D)] \}^{1/2} \quad (13)$$

$$\text{缓变结: } X_m = [12\epsilon\epsilon_0V / (qa)]^{1/3} \quad (14)$$

其中: $N_A \cdot N_D$ 分别表示PN结两侧受主和施主杂质密度;

a 为PN结处杂质浓度梯度;

x_m 为PN结空间电荷区宽度;

ϵ_0 、 ϵ 分别表示真空电容率和相对介电常数。

一般 J_1 、 J_2 结可看作突变结, J_3 可看作是缓变结。

这样, 基区的有效宽度为零偏时的基区宽度减去相应空间电荷区的宽度, 将基区有效宽度代入(7)(8)(9)(10)式, 则 K_i 就成为PN结电压的函数了, 代入(11)式可知空间电荷区复合—产生电流系数也同样是PN结电压的函数。

根据以上讨论, 可以形成晶闸管的一个直流模型, 要反映出瞬态特性, 还须进一步讨论电荷存贮变化的影响。

1.5 电荷存贮效应

(1) 结电容: 结电容是对外加电压变化引起空间电荷区中电荷存贮变化的模拟, 类似于一般晶体三极管结电容方程的推导, 其方程表示如下:

$$\text{对于突变结: } C_{j1} = C_{j0} / (\phi'_1 - V_1)^{1/2} \quad (l = 1, 2, 3)$$

$$\text{其中: } C_{j0} = A [q \epsilon \epsilon_0 N_D / 2]^{1/2}$$

$$\phi'_1 = \phi_1 + (KT/q) [1 - \ln(N_A/N_D)] \quad (N_A/N_D > 10)$$

$$\text{对于线性缓变结: } C_{j1} = C_{j0} / \phi'_1 - V_1)^{1/3} \quad (l = 1, 2, 3)$$

$$\text{其中: } C_{j0} = A \cdot [q (\epsilon \epsilon_0)^2 a / 12]^{1/3}$$

$$\phi'_1 = 2/3 \cdot (KT/q) \cdot \ln [a^2 (KT/q) \epsilon \epsilon_0 / (8 q n_i^2)]$$

(2) 扩散电容: 如果PN结加正向电压, N区就有非平衡空穴, 等于存贮了正电荷, 同时有从电极来的非平衡电子要和空穴中和, 这等于存贮了负电荷。可以将PN结扩散区内少数载流子电荷随电压的变化看成是PN结扩散电容效应。当电压增大, 扩散区的电荷量增加, 相当于电容充电; 当电压减小, 扩散区的电荷量减少, 相当于电容放电。通过计算扩散区内的非平衡少数载流子, 找出与扩散电流的关系, 得到扩散电容方程如下:

$$C_{D1} = (\tau_{pN1} / \bar{V}_1) (I_1 - k_2 I_1) \quad (19)$$

$$C_{D2} = (\tau_{pN2} / \bar{V}_2) (I_2 - k_1 I_2) \quad (20)$$

$$C_{D3} = (\tau_{nP2} / \bar{V}_3) (I_3 - k_3 I_3) \quad (21)$$

其中: τ_{pN1} 、 τ_{pN2} 分别表示长短基区内少子寿命;

\bar{V}_1 ($l = 1, 2, 3$) 是正向导通电压, 一般取0.5~0.7V。由此可见, 扩散电容可表示为扩散电流的函数, 而 $\tau_{pN1} (I_2 - k_1 I_2)$ 正反映了与 J_1 结通过电流相关的长基区中非平衡电荷, 式(20)(21)同样反映了对非平衡电荷变化的模拟。由于 K_i 已 I_1 已含有对基区宽度调制效应及雪崩倍增效应的考虑, 因此自然地考虑了这些因素对扩散电容的影响。 I_1 , $K_i I_1$ 是模型中可以直接引用的电流量, 因此对扩散电容效应进行模拟的方程简单且物理意义明确。

1.6 发射结短路结构

为了使晶闸管有良好的阻断特性, 同时又具有良好的导通特性, 目前实际生产中普遍采用短路发射结的方法。考虑发射结短路结构, 在模型中发射结等效二极管旁增加一并联电阻 R_g :

$$R_g = [\bar{\rho}_1 / (2 \pi W p_2)] \cdot \ln (r_1 / r_0)$$

其中： ρ_1 为短基区平均电阻率； W_{p2} 为短基区宽度； r_1 为短路环外半径； r_0 为短路环内半径。

到此，我们得到了一个能反映晶闸管动态非线性特性的模型，该模型如图(2)所示。其中： I_1 为(1)(2)(3)式的前一项，即 $I_1 = I_{r1} (e^{qv_1} / kT - 1)$ ； C_1 为结电容与扩散电容之和： $C_1 = C_{D1} + C_{j1}$ 。

由上述推导可见，模型的元件是由实际器件的结构参数所决定时。模型参数确定之后，可以用一般的电子电路分析程序对晶闸管电路进行分析。作者用占有400kB内存的通用电路分析程序ECAP对晶闸管电路进行了分析，取得了较好的结果，下面给出部分仿真实例。

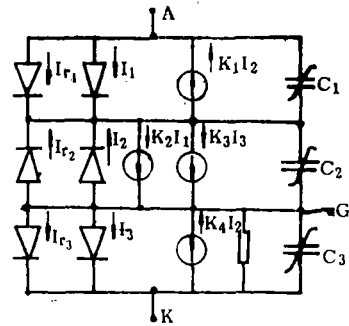


图2 晶闸管仿真模型
Fig.2 Thyristor model for simulation

2 晶闸管仿真分析举例

根据工厂实际测量的晶闸管参数，以KP500晶闸管为例，对器件特性及RC过压保护电路等进行了仿真分析，取得了与实际特性一致的结果。在此给出仿真模型的主要参数及两个特性仿真分析结果。

KP500晶闸管模型的主要参数如下：

$$I_{r1} = 5.4 \times 10^{-9} \text{ (A)}, I_{r2} = 8.3 \times 10^{-9} \text{ (A)}, I_{r3} = 1.8 \times 10^{-10} \text{ (A)}$$

$$I_{rj1} = 1.7 \times 10^{-6} \text{ (A)}, I_{rj2} = 1.5 \times 10^{-6} \text{ (A)}, I_{rj3} = 5.3 \times 10^{-7} \text{ (A)}$$

$$C_{j01} = 1.3 \times 10^{-8}, C_{j02} = 1.24 \times 10^{-8}, C_{j03} = 2.1 \times 10^{-7}$$

$$m_1 = 0.5, m_2 = 0.5, m_3 = 0.33$$

$$\phi_1 = 0.707, \phi_2 = 0.707, \phi_3 = 1.02$$

$$\tau_{pn1} = 3 \times 10^{-5}, \tau_{pn2} = 3 \times 10^{-5}, \tau_{pn3} = 3.8 \times 10^{-6}$$

$$V_B = 2363.5 \text{ (V)}$$

(1) KP500晶闸管直流特性仿真结果

图3给出了晶闸管正反向耐压的仿真结果，这个结果与实际特性是相符的。

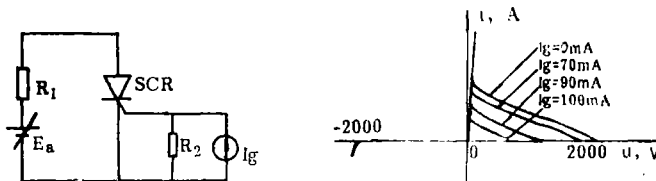


图3 晶闸管正反向耐压特性仿真分析
Fig.3 Simulation of thyristor withstand voltage character

(2) KP500晶闸管瞬态特性仿真结果

图4给出了导通、关断时,晶闸管电流和电压变化曲线。这组仿真曲线与实际特性也基本一致,由于实际产品特性分散性很大,因此对不同特性参数的晶闸管仿真时,需对相关的模型参数做一些调整。

另外,还可以用该模型对 dv/dt 等器件特性进行分析,并可以用于电路分析。在实际电路分析中,还可以根据具体分析对象,对模型作适当的简化,在保证一定精度的前提下,可减少计算机的运行时间。

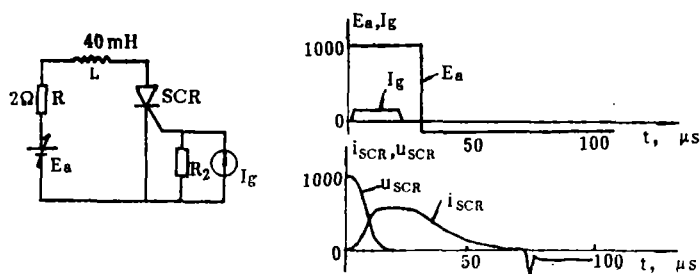


图4 晶闸管瞬态特性的仿真分析结果

Fig.4 Simulation of thyristor transient character

实际分析结果说明,晶闸管的这一等效电路模型是可行的,能够反映出实际元件的特性,对于使用计算机辅助分析晶闸管电路具有实际意义。

3 结 语

本文建立的器件模型是从器件物理过程进行分析推导的,因而模型反映的物理意义明确,从分析结果看与实际器件特性是相符的。在实际分析中,可根据具体对象和分析要求,对模型作相应简化,这样可以节省机时。另外,温度对模型参数的影响还有待于进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Kutman, T. : *IEEE*, Vol. IECI-21, 1974
- [2] Chua, L. : *IEEE*, 1980
- [3] Williams, B. V. : *Solid-State Element*, Vol. 25, No. 5, 1982
- [4] 木村勤, 村上吉繁: 少数キャリアの挙動に着目したサイリスタモデルとそれ
にもとづく回路のシミュレーション 电子通信学会研究会资
料CAS81-123
- [5] 浙江大学半导体器件教研室: 晶体管原理, 1980 国防工业出版社
- [6] 清华大学, 北京变压器厂: 大功率可控硅原理与设计, 1975, 人民教育出版社