

УДК 621.382

Теория симистора

Ю. А. Евсеев

ГУП "Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина", Москва, Россия

Предложена модель p - n - p - n -структуры, управляемой током широкой n -базы, состоящая из p - n - p - n -структуры, управляемой током узкой p -базы, и p - n - p -транзистора. На ее основе получены выражения тока симистора, соотношения, связывающие токи управления, токи переключения, области первоначального включения, времена задержки включения симистора в прямом и обратном направлениях.

Исследования многослойных электронно-дырочных структур, проведенные в бывшем СССР и США, позволили заявить об изобретении нового твердотельного переключателя переменного тока — симметричного тиристора (симистора) или, по американской терминологии, триака [1—3]. В последующих публикациях рассмотрены принцип действия и статические характеристики [4, 5, 7], особенности переходного процесса включения симистора [6, 7]. Анализ проводился на основе известной модели p - n - p - n -структуры, включаемой током узкой p -базы [8], что позволило получить выражение тока через симистор для статических и переходных режимов. Показано, что включение симистора в обратном направлении осуществляется частью тока управления, ответвляемой в широкую n -базу, при этом эквивалентная схема прибора может быть представлена в виде p - n - p - n -структуры и n - p - n -транзистора, коллектор которого по схеме с общей базой присоединен к n -базе p - n - p - n -структуры. Наличие этого транзистора должно приводить к некоторому увеличению времени задержки симистора в обратном направлении. Вместе с тем не удалось объяснить ряд эффектов, наблюдаемых экспериментально: аномально большие значения времени задержки тока в обратном направлении, наличие для некоторых образцов симисторов токов управления меньших, чем в прямом направлении, не удалось получить основные соотношения, связывающие параметры симистора в прямом и обратном направлениях, а именно, токи управления, токи включения, а также времена задержки включения. В настоящей работе получены ответы на эти вопросы за счет использования новой модели включения p - n - p - n -структуры, управляемой током широкой n -базы.

Особенности прямой и обратной ветвей вольт-амперной характеристики симистора

Наиболее типичная структура симистора изображена на рис. 1, а [9]. Она может быть представлена в виде двух встречно-ориентированных p - n - p - n -структур, причем правая прямоориентированная структура является структурой обычного тиристора, управляемого током узкой p -базы, а левая — обратноориентированная структура — p - n - p - n -структурой с инжектирующим управляющим электродом или с управляющим электродом, размещенным на анодной поверхности структуры.

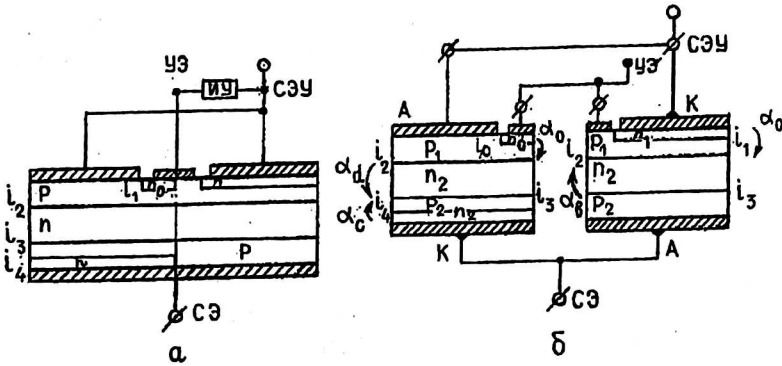


Рис. 1. Полупроводниковая структура (а) и эквивалентная схема симистора (б)

Выражение тока *p-n-p-n*-структуры с инжектирующим управляющим электродом [10] определяется как

$$I = \frac{I_{kcd} + I_y \alpha_0 \alpha_d}{1 - \alpha_c - \alpha_d}, \quad (1)$$

где $\alpha_c, \alpha_d, \alpha_0$ — коэффициенты передачи тока условных $p_1-n_2-p_2, n_3-p_1-n_2, n_0-p_1-n_1$ триодов;

I_{kcd} — обратный ток центрального перехода J_2 .

Ток I_{kcd} отличается от выражения *p-n-p*-структуры, управляемой током *n*-базы, наличием коэффициента α_0 , что отражает присутствие в цепи управления рассматриваемой структуры $n_0-p_1-n_1$ триода, включенного по схеме с общей базой, иначе говоря, в *n*-базу поступает не весь ток I_y , а его часть $\alpha_0 I_y$.

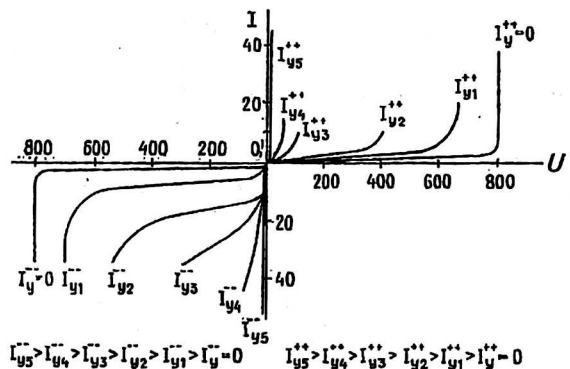
Включение симистора таким образом в прямом направлении осуществляется по узкой *p*-базе положительным сигналом управления и в обратном направлении — по широкой *n*-базе отрицательным сигналом управления. Вольт-амперная характеристика симистора представлена на рис. 2. Если сравнить прямую и обратную ветви характеристики, можно отметить следующие особенности:

ток переключения в прямом направлении с увеличением тока управления уменьшается и возрастает непосредственно перед спрямлением характеристики, ток переключения в обратном направлении вначале практически не изменяется, а затем возрастает непосредственно перед спрямлением;

в обратном направлении четко прослеживается транзисторная составляющая тока;

ток управления-спрямления и ток переключения в обратном направлении превышают эти параметры в прямом направлении.

Рис. 2. Вольт-амперная характеристика симистора



Отмеченные особенности приводят к необходимости более сложного механизма включения симистора в обратном направлении или, другими словами, более сложного механизма включения $p-n-p-n$ -структуры при управлении по n -базе.

Включение $p-n-p-n$ -структуры током широкой базы

Рассмотрим включение $p-n-p-n$ -структуры током n -базы (рис. 3). Отметим, что коэффициенты усиления $n-p-n$ и $p-n-p$ -составных транзисторов реальных $p-n-p-n$ -структур по-разному зависят от тока через $p-n-p-n$ -структуру, при этом α_d практически не зависит от тока, а α_c вплоть до некоторого порогового тока I_n равен нулю, а затем резко возрастает до некоторого значения и далее в интервале токов вплоть до тока переключения практически постоянен. Исходя из этой особенности, можно предположить, что в начале протекания тока управления происходит усиление этого тока $p-n-p$ -транзистором, включенным по схеме с общим эмиттером, затем усиленный ток поступает в p -базу $p-n-p-n$ -структуры.

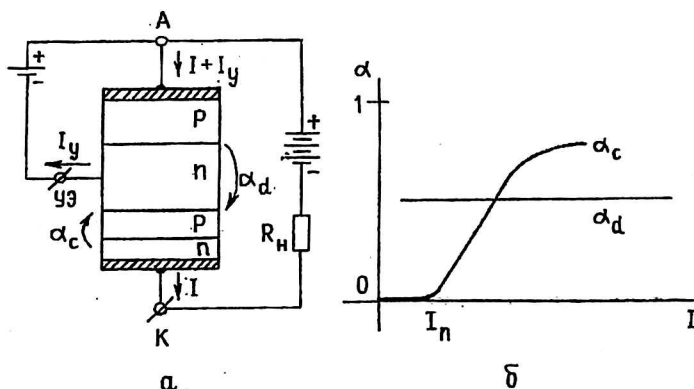


Рис. 3. $p-n-p-n$ -структура, управляемая током n -базы (а) и зависимость коэффициентов составных транзисторов от тока (б)

Здесь возможны два режима.

Если усиленный ток не превышает I_n , то $\alpha_c = 0$, и через структуру протекает ток

$$I = \frac{I_y \alpha_d + I_{kcd}}{1 - \alpha_d}. \quad (2)$$

Если усиленный ток превышает I_n , $\alpha_c > 0$, то возникает положительная обратная связь между токами эмиттерных переходов $p-n-p-n$ -структуры и при некотором значении тока через структуру она переходит в проводящее состояние.

Если в выражении (1) выделить в виде отдельного члена транзисторную составляющую (2), то оно примет следующий вид:

$$I = \frac{I_y \alpha_d + I_{kcd}}{1 - \alpha_d} + \frac{\left(\frac{I_y \alpha_d + I_{kcd}}{1 - \alpha_d} \right)}{1 - \alpha_c - \alpha_d}, \quad (3)$$

где первый член является коллекторным током $p-n-p$ -транзистора, а второй, если пренебречь обратным током $p-n-p-n$ -структуры, есть не что иное, как ток $p-n-p-n$ -структуры, в p -базу которой поступает ток $(I_{y\alpha_d} + I_{kcd})(1 - \alpha_d)$. Соответственно эквивалентную схему $p-n-p-n$ -структуры, управляемой током широкой n -базы, можно представить в виде тиристора и транзистора, эмиттер которого связан с анодом, а коллектор — с управляющим электродом тиристора (рис. 4). Эта эквивалентная схема и выражение (3) позволяют получить ряд важных соотношений между параметрами $p-n-p-n$ -структуры при управлении током p -базы и n -базы. Если пренебречь током утечки коллекторного перехода, то из (3) имеем следующую взаимосвязь:

между токами управления

$$I_{yp} \sim I_{yn} \beta_n, \tag{4}$$

где I_{yp} , I_{yn} — токи управления $p-n-p-n$ -структурой, соответственно, по p - и по n -базе,

$$\beta = \frac{\alpha_n}{1 - \alpha_n}, \tag{5}$$

и токами переключения

$$I_{пер.n} = I_{пер.p} + I_{yn} \beta_n,$$

где $I_{пер.n}$ — ток переключения $p-n-p-n$ -структуры, в n -базу которой поступает ток I_{yn} ;

$I_{пер.p}$ — ток переключения $p-n-p-n$ -структуры, в p -базу которой поступает $(I_{yn}\alpha_d + I_{kcd})(1 - \alpha_d)$.

Если учесть, что $p-n-p-n$ -структура находится во включенном состоянии, когда в p -базу поступает ток не менее $I_{y.c.p}$ ($I_{y.c.p}$ — ток управления-спрямления $p-n-p-n$ -структуры при поступлении тока управления в p -базу), то получим соотношение, связывающее ток удержания $p-n-p-n$ -структур и $I_{y.c.p}$

$$I_{уд} \sim I_{y.c.p} / \alpha_n. \tag{6}$$

По аналогии с [12], используя (4), легко получить выражение для области первоначального включения в случае линейной геометрии управляющего электрода.

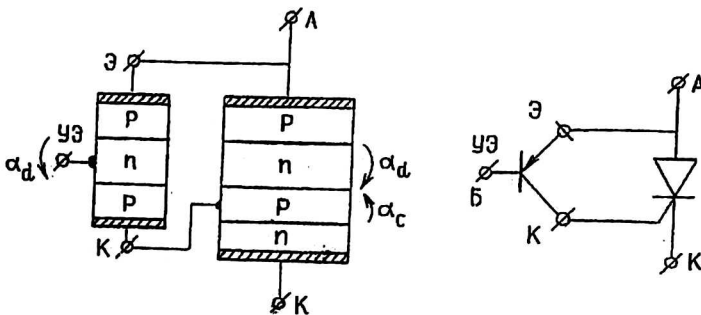


Рис. 4. Транзисторно-тиристорная модель $p-n-p-n$ -структуры, управляемой током n -базы

Основные соотношения симистора

Выражения для тока $p-n-p-n$ -структуры, управляемой током широкой n -базы (3), позволяют получить ряд выражений для обратноориентированной $p-n-p-n$ -структуры с инжектирующим управляющим электродом. Так,

выражение тока этой структуры, где выделена транзисторная составляющая, получим в виде

$$I = \frac{I_y^- \alpha_0 \alpha_d + I_{kcd}}{1 - \alpha_d} + \frac{\left(\frac{I_y^- \alpha_0 \alpha_d + I_{kcd}}{1 - \alpha_d} \right) \alpha_c}{1 - \alpha_c - \alpha_d}, \quad (7)$$

где I_y^- — ток управления симистора отрицательной полярности в обратном направлении.

Первый член описывает транзисторную составляющую тока и представляет собой ток транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, в базовой цепи которого находится транзистор, включенный по схеме с общей базой. Второй член — ток $p-n-p-n$ -структуры, в p -базу которой поступает транзисторная составляющая — первый член выражения (7).

Используя выражения (4)—(7), получим:

соотношение токов управления в прямом и обратном направлениях при положительной и отрицательной, соответственно, полярностях управления $I_{y.c}^{++}$ и $I_{y.c}^{--}$

$$I_{y.c}^{++} = I_y^- \beta_d \alpha_0; \quad (8)$$

соотношение токов переключения в прямом и обратном направлениях $I_{пер}^{++}$ и $I_{пер}^{--}$

$$I_{пер}^{--} = I_{пер}^{++} + I_y^- \beta_d \alpha_0;$$

соотношение областей первоначального включения S_0^{++} и S_0^{--}

$$\frac{S_0^{++}}{S_0^{--}} = \frac{\omega_p \rho_n}{\rho_p \omega_n \beta_d \alpha_0}.$$

Следует иметь в виду, что $I_y^{++} = I_{yp}$, $I_{пер}^{++} = I_{пер.p}$, $S_0^{++} = S_{p0}$.

Из (8) следует, что условием равенства токов управления в прямом и обратном направлениях является соотношение

$$\beta_d \alpha_0 = 1, \quad (9)$$

поскольку, как правило, задается способом изготовления и составляет величину 0,8—0,9, то, приняв $\alpha_0 = 0,8$, получим, что соотношение (9) реализуется для $\beta_d = 1,25$. При $\beta_d > \alpha_0$ ток управления в обратном направлении меньше тока управления в прямом направлении. Используя те же типичные значения, как и в случае расчета соотношения S_{p0}/S_{n0} , получим $S_0^{++}/S_0^{--} = 1,83$, т. е. наличие дополнительного транзистора в цепи управления уменьшает область первоначального включения в обратном направлении.

Рассмотрим переходной процесс включения симистора в обратном направлении, иначе говоря, включения обратноориентированной $p-n-p-n$ -структуры с инжектирующим управляющим электродом. Ток, в соответствии с выражением (7), может быть представлен в виде двух составляющих: транзисторной $i_{d(оз)}(t)$ и тиристорной $i_{cd}(t)$

$$i(t) = i_{d(оз)}(t) + i_{cd}(t).$$

Выражение для $i_{d(оэ)}(t)$ получим для тока I_y^- в виде ступенчатой функции, используя уравнение заряда для базы n_1 транзистора с индексом d и учитывая, что выражение тока, поступающего в базу n_1 из цепи управления, имеет вид

$$i_{уп}(t) = I_y^- \alpha_0 \left(1 - e^{-\frac{t-t_{з(об)}^{(0)}}{\tau_{0(об)}}} \right),$$

в следующем виде для $t > t_{з(об)}^{(0)} + t_{з(оэ)}^{(d)}$

$$i_{d(оэ)}(t) = \left(\frac{I_y^- \beta_d \alpha_0}{\tau_d} - \tau_{0(об)} \right) \times \left[\tau_d \left(1 - e^{-\frac{t-t_{з(об)}^{(0)}-t_{з(оэ)}^{(d)}}{\tau_d}} \right) - \tau_{0(об)} \left(1 - e^{-\frac{t-t_{з(об)}^{(0)}-t_{з(оэ)}^{(d)}}{\tau_{0(об)}}} \right) \right],$$

где $t_{з(об)}^{(0)}$ и $t_{з(оэ)}^{(d)}$ — задержки коллекторных токов транзистора с индексом «0» в схеме с общей базой и транзистора с индексом «d» — в схеме с общим эмиттером;

$\tau_{0(об)}^{(0)}$ и $\tau_{з(оэ)}^{(d)}$ — постоянные нарастания коллекторного тока транзисторов с индексом «0» и «d» в схеме с общими базой и эмиттером.

Тиристорная составляющая при использовании аппроксимации работы [8] может быть представлена в виде

$$i_{cd}(t) = \begin{cases} 0 & \text{для } t \leq t_{з(об)}^{(0)} \\ i_{d(оэ)} \left(t_{з(об)}^{(0)} + t_{з(оэ)}^{(d)} + t_{н}^{(cd)} + t_{зс}^{(cd)} - A_{cd} + \right. \\ \left. + B_{cd} \tau_{cd} e^{\left(t-t_{з(об)}^{(0)}-t_{з(оэ)}^{(d)}-t_{н}^{(cd)} \right) \tau_{cd}} \right) & \\ \text{для } t \geq t_{з(об)}^{(0)} + t_{з(оэ)}^{(d)} + t_{н}^{(cd)} + t_{зс}^{(cd)}, & \end{cases}$$

где $t_{зс}^{(cd)}$ — собственное время задержки $p-n-p-n$ -структуры;

$\tau_{cd}, A_{cd}, B_{cd}$ — параметры $p-n-p-n$ -структуры;

$t_{н}^{(cd)}$ — время накопления критического заряда в p -базе $p_1-n_2-p_2-n_2$ -структуры;

$t_{н}^{(cd)}$ — находится из решения уравнения заряда в базе p_2 [11].

Кривая нарастания тока обратноориентированной $p-n-p-n$ -структуры с инжектирующим управляющим электродом, представленная на рис. 5, объясняет большие величины экспериментально наблюдаемой задержки включения этой структуры.

Если иметь в виду, что собственная задержка $p_2-n_2-p_1-n_1$ -структуры $t_{3c}^{(ab)}$ равна $t_{3c}^{(cd)}$, то разность задержек тока симистора в прямом и обратном направлении получим в виде

$$t_3^{--} - t_3^{++} = t_{3(об)}^{(0)} + t_{3(оз)}^{(d)} + t_H^{(cd)}.$$

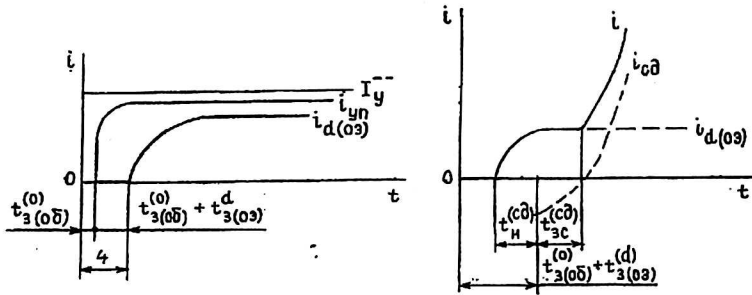


Рис. 5. Осциллограммы токов в составных элементах и обратноориентированной $p-n-p$ -структуре с инжектирующим управляющим электродом

Поскольку при $I_y^{--} \gg I_{yc} t_H^{(cd)} \rightarrow 0$, то $t_3^{--} - t_3^{++} = t_{3(об)}^{(0)} + t_{3(оз)}^{(d)}$, откуда следует, что увеличенная задержка включения симистора в обратном направлении в силу того, что, как правило, $t_{3(об)}^{(0)} \ll t_{3(оз)}^{(d)}$ в основном определяется временем задержки $p_1-n_2-p_2$ -структуры с широкой базовой областью.

Л и т е р а т у р а

1. Думаневич А. Н., Евсеев Ю. А. Симметричный тиристор: А. с. 349356, 22.06.63; Оpubл. Б. И. № 20. 30.05.88.
2. Думаневич А. Н., Евсеев Ю. А. Симметричный тиристор с однополярным управлением: А. с. 238017, 24.12.63; Оpubл. Б. И. № 9. 20.02.69.
3. Gentry F. Semiconductor switching: Patent 3391310 USA. 13.01.64.
4. Евсеев Ю. А., Ситник Н. Х. Варианты несимметричных и симметричных переключателей (тиристоров)// Силовая полупроводниковая техника. 1965. Вып. IV. — М.: Информстандартэлектро.
5. Евсеев Ю. А., Челноков В. Е. Об ответвлении входного тока в область коллектора плоскостного транзистора// Радиотехника и электроника. 1966. Т. 11. № 5. С. 958—959.
6. Евсеев Ю. А., Лебедев В. Е. О включении тиристорov с инжектирующим управляющим электродом// Там же. 1967. Т. 12. № 7.
7. Челноков В. Е., Евсеев Ю. А. Физические основы работы силовых полупроводниковых приборов. — М.: Энергия, 1973. — 279 с.
8. Лебедев А. А., Уваров А. И., Челноков В. Е. Переходная характеристика $p-n-p$ -структуры// Радиотехника и электроника. 1966. Т. 11. № 8. С. 1458—1466.
9. Евсеев Ю. А., Думаневич А. Н., Василенко В. С., Челноков В. Е. Симметричный тиристор с током управления любой полярности: А. с. 238016, 25.09.64; Оpubл. Б. И. № 2. 20.02.69.
10. Василенко В. С., Евсеев Ю. А. Тиристор с катодом на основании// Силовая полупроводниковая техника. 1965. Вып. III. — М.: Информстандартэлектро.
11. Лебедев А. А., Уваров А. И. Включение симметричной $p-n-p$ -структуры при учете зависимости коэффициентов усиления от тока// Радиотехника и электроника. 1967. Т. 12. № 5. С. 895—905.
12. Евсеев Ю. А. Полупроводниковые приборы для мощных высоковольтных преобразовательных устройств. — М.: Энергия, 1978.

The theory of the simistor

Yu. A. Evseev

The Lenin's All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

A model of the p-n-p-n-structure controlled by a current of the broad n-basis is offered. The expressions for a simistor current, the ratio linking currents of control, currents of switching, areas of primal actuation, hold times of simistor actuation in direct and revertive directions are obtained on its basis.