

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 1 — 1963

Г. С. КАЧУХАШВИЛИ, Т. Н. ЯСТРЕБЦЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОКОВЫХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Исследуется схема токового переключателя на сплавных полупроводниковых триодах. Получено аналитическое выражение для вольтамперной характеристики токового переключателя, из которого затем определяется минимальная амплитуда внешнего сигнала переключения и входное сопротивление токового переключателя. Исследовано дифференциальное уравнение схемы токового переключателя с учетом частотных свойств полупроводникового триода. Дано решение этого уравнения при некоторых упрощениях. Определена длительность времени переключения. Результаты теоретических расчетов хорошо согласуются с экспериментом.

В последнее время появились статьи о применении в вычислительной технике новых высокоскоростных схем на полупроводниковых триодах, так называемых токовых переключателей. В работах [1—4] достаточно подробно описывается принцип действия этих схем и приводятся экспериментальные данные, касающиеся их работы. Показано, что в случае применения высокочастотных триодов в этих схемах могут быть получены времена переключения порядка наносекунд. Кроме того, показано, что данные схемы обладают чрезвычайно низким уровнем шумов, высокой стабильностью и рядом других преимуществ. В указанных статьях приводятся примеры применения токовых переключателей во всевозможных логических схемах, триггерах и т. д.

В настоящей статье проводится теоретический анализ работы токового переключателя, выводятся выражения для его вольтамперных характеристик, входного сопротивления в области переключения, анализируются частотные свойства и исследуется зависимость времени переключения от параметров триодов и схемы. Анализ проведен для плоскостных триодов сплавного типа. Теоретические выводы сравниваются с экспериментальными данными.

Вольтамперные уравнения токового переключателя

Типичная схема токового переключателя приведена на рис. 1. В эмиттеры триодов T_1 и T_2 задается постоянный ток I от общего источника. База T_2 заземлена, а на базу T_1 подается напряжение U . Если $U < 0$ и по абсолютной величине больше некоторого U_{n-} , ток полностью переключается в триод T_1 . При подаче положительного напряжения, если $U > U_{n+}$, ток полностью переключится в триод T_2 .

Вольтамперная характеристика токового переключателя приведена на рис. 2.

Под вольтамперными уравнениями токового переключателя понимаются выражения, дающие зависимость эмиттерных и коллекторных токов триодов от напряжения U . Для получения аналитического выражения этих характеристик необходимо решить уравнения диффузии неосновных носителей в базах триодов с соответствующими граничными условиями совместно со следующими двумя уравнениями, очевидными для схемы рис. 1:

$$J_{\varepsilon 1} + J_{\varepsilon 2} = J, \quad (1)$$

$$V_{\varepsilon 1} + U = V_{\varepsilon 2}, \quad (2)$$

где $V_{\varepsilon 1}$ и $V_{\varepsilon 2}$ — напряжения на эмиттерных переходах триодов. Уравнение (2) получается при допущении, что электрическое поле в базах отсутствует и все напряжение между базой и эмиттером триодов прикладывается к эмиттерным $p-n$ переходам.

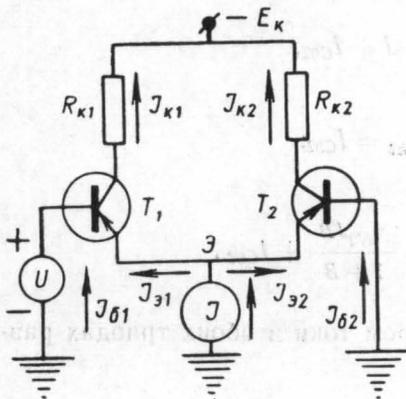


Рис. 1. Принципиальная схема токового переключателя

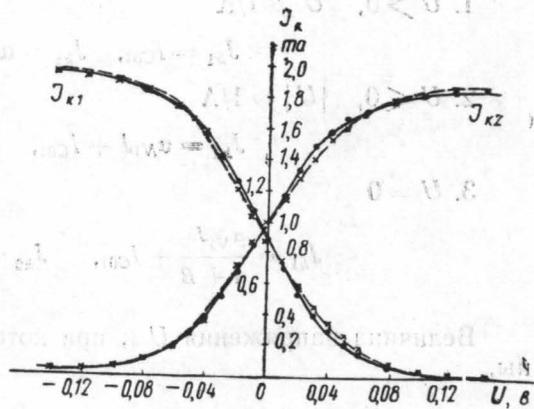


Рис. 2. Вольтамперные характеристики токового переключателя — — — — — теоретические характеристики (по формулам (5а) и (6а)), x — экспериментальные характеристики

При этом обычном допущении решение стационарных диффузионных уравнений дает вольтамперные уравнения триодов. Если принять обозначения, введенные в работе [5], и решить эти вольтамперные уравнения совместно с (1) и (2), мы получим вольтамперные уравнения токового переключателя:

$$J_{\varepsilon 1} = \frac{I}{1 + Be^{\Delta U}} + \frac{I_{E01} + \alpha_{I1} I_{C01}}{1 + \alpha_{N1} \alpha_{I1}}, \quad (3)$$

$$J_{\varepsilon 2} = I \left(1 - \frac{1}{1 + Be^{\Delta U}} \right) + \frac{I_{E02} + \alpha_{I2} I_{C02}}{1 - \alpha_{N2} \alpha_{I2}}, \quad (4)$$

$$J_{k1} = \frac{1}{1 + Be^{\Delta U}} + \frac{\alpha_{N1} I_{E01} + I_{C01}}{1 - \alpha_{N1} \alpha_{I1}}, \quad (5)$$

$$J_{k2} = \alpha_{N2} I \left(1 - \frac{1}{1 + Be^{\Delta U}} \right) + \frac{\alpha_{N2} I_{E02} + I_{C02}}{1 - \alpha_{N2} \alpha_{I2}}, \quad (6)$$

где I_{E0} и I_{C0} — обратные эмиттерные и коллекторные токи, α_N и α_I — прямой и обратный коэффициенты усиления по току, $\Lambda = q/kT$

$$I = J - \frac{I_{E01} + \alpha_{I1} I_{C01}}{1 - \alpha_{N1} \alpha_{I1}} - \frac{I_{E02} + \alpha_{I2} I_{C02}}{1 - \alpha_{N2} \alpha_{I2}},$$

$$B = \frac{I_{E02} (1 - \alpha_{N1} \alpha_{I1})}{I_{E01} (1 - \alpha_{N2} \alpha_{I2})}.$$

Уравнения (5) и (6) можно упростить, считая $I = J$, $1 - \alpha_I \approx 1 - \alpha_N \alpha_I$:

$$J_{k1} \approx \frac{\alpha_{N1} J}{1 + B e^{\Lambda U}} + I_{C01}, \quad (5a)$$

$$J_{k2} \approx \alpha_{N2} J \left(1 - \frac{1}{1 + B e^{\Lambda U}} \right) + I_{C02}. \quad (6a)$$

Рассмотрим три случая:

1. $U > 0$, $U \gg 1/\Lambda$

$$J_{k1} = I_{C01}, \quad J_{k2} = \alpha_{N2} J + I_{C02},$$

2. $U < 0$, $|U| \gg 1/\Lambda$

$$J_{k1} = \alpha_{N1} J + I_{C01}, \quad J_{k2} = I_{C02};$$

3. $U = 0$

$$J_{k1} = \frac{\alpha_{N1} J}{1 + B} + I_{C01}, \quad J_{k2} = \frac{\alpha_{N2} J B}{1 + B} + I_{C02}.$$

Величина напряжения U_- , при котором токи в обоих триодах равны,

$$U_- \approx -\frac{1}{\Lambda} \ln \left(B \frac{\alpha_{N2}}{\alpha_{N1}} \right). \quad (7)$$

Для триодов, у которых все параметры одинаковы, $\alpha_{N1} = \alpha$; $B = 1$ и $U_- = 0$.

С помощью выражений (3) — (6) можно найти значение минимальной амплитуды внешнего напряжения, необходимого для полного переключения схемы. Если под полным переключением понимать изменение тока в триоде от I_{C0} до $\alpha_N J + I_{C0}$, то минимальная амплитуда переключающего сигнала равна

$$|\Delta U|_{\min} \approx \frac{1}{\Lambda} \ln \frac{J^2 (1 - \alpha_{N1} \alpha_{I1}) (1 - \alpha_{N1} \alpha_{I2})}{I_{E01} I_{E02} (1 - \alpha_{N1}) (1 - \alpha_{N\alpha})}. \quad (8)$$

Для разных значений J , α_N , α_I и I_{E0} эта величина может меняться от 0,3 до 0,7 в.

На рис. 2 приведена экспериментальная вольтамперная характеристика токового переключателя на триодах П5Б и теоретическая, построенная по формулам (5а) и (6а). Параметры триодов были следующие:

$\alpha_{N1} = 0,93$; $\alpha_{N2} = 0,98$; $\alpha_{I1} = 0,75$; $\alpha_{I2} = 0,51$; $I_{E01} = 0,8 \cdot 10^{-6} a$; $I_{E02} = 1,1 \cdot 10^{-6} a$; $I_{C01} = 10^{-8} a$; $I_{C02} = 2,2 \cdot 10^{-8} a$; $J = 2 \text{ ма}$.

Расчет величины входного сопротивления

В области переключения при малых изменениях входного сигнала относительно заданного постоянного смещения U токовый переключатель можно представить как линейный шестиполусник, у которого входными величинами являются напряжение u (малое изменение напряжения U) и ток $i_{\delta 1}$ (малое изменение $J_{\delta 1}$), а выходными — i_{k1} , u_{k1} , i_{k2} , u_{k2} (соответственно, малые изменения J_{k1} , V_{k1} , J_{k2} , V_{k2}). Дифференциальные проводимости получаются после дифференцирования выражений (3) — (6) и замены $J_{\delta 1} = J_{k1} - J_{\delta 1}$. При этом пренебрегается эффектом модуляции толщины базы, так как сопротивления нагрузок очень малы. Учитывая омические сопротивления баз $r_{\delta 1}$ и $r_{\delta 2}$, найдем связь между изменениями токов и напряжения на входе, т. е. функции $i_{\delta}(u)$ и $i_k(u)$. Из полученного выражения для $i_{\delta}(u)$ находим дифференциальное входное сопротивление $R_{вх}$:

$$R_{вх} = r_{\delta 1} + \frac{1 - \alpha_{N2}}{1 - \alpha_{N1}} r_{\delta 2} + \frac{1}{(1 - \alpha_{N1} G(U))}. \quad (9)$$

Минимальное значение $R_{вх}$ будет иметь при $U = U_-$, т. е. в точке, где крутизна вольтамперной характеристики максимальна. При этом $G(U_-) = \frac{\Delta J}{4}$.

Второй член существенно зависит от соотношения $1 - \alpha_{N1}$ и $1 - \alpha_{N2}$. Если принять $r_{\delta 1} \approx r_{\delta 2} \approx 100$ ом, $\alpha_{N1} \approx \alpha_{N2} = 0,96$, $J = 5$ ма, то $R_{вх\min} = 720$ ом.

При всех других значениях U $R_{вх}$ будет больше, а вне области переключения оно согласно (9) стремится к бесконечности. Практически же в этом случае $R_{вх}$ будет определяться внутренним сопротивлением источника тока J .

Исследование переходных характеристик

Переключение тока в токовом переключателе происходит под действием скачка напряжения, которое подается на базу одного из триодов. Как известно, во всех случаях, когда триоды управляются напряжением, существенную роль в формировании переходной характеристики играет цепочка, состоящая из омического сопротивления базы и диффузионной емкости эмиттера.

Пусть при $t < 0$ ток J (см. рис. 1) протекает через триод T_2 , а при $t = 0$ на базу T_1 подается скачок напряжения — U . Процесс переключения тока в токовом переключателе можно условно разбить на два этапа.

Первый этап соответствует процессу нарастания тока в триоде T_1 под воздействием внешнего импульса напряжения и процессу убывания тока в триоде T_2 . В первый момент напряжение U оказывается целиком приложенным к эмиттерному $p-n$ переходу T_{\perp} , в триоде T_1 произойдет начальный скачок эмиттерного тока [6], а затем эмиттерный ток будет нарастать с постоянной времени, определяемой омическим сопротивлением базы и диффузионной емкостью эмиттера. Ток коллектора будет нарастать с той же постоянной времени.

Второй этап начинается с момента, когда ток через триод становится достаточно малым и фактически ограничивается связь через триод T_2 между землей и точкой Э. К этому моменту напряжение на

эмиттерном переходе T_1 уже не будет определяться напряжением U , а только величиной тока J и свойствами этого перехода. Напряжение на эмиттерном переходе T_2 становится отрицательным и определяется суммой напряжения $-U$ и напряжения на эмиттерном переходе T_1 .

Перейдем к количественному описанию процесса переключения. Для этого составим эквивалентную схему токового переключателя, используя обычно принимаемые допущения: толщина базы триода много меньше длины и ширины базы и длины диффузии; влияние коллекторной емкости и модуляции толщины базы не учитывается, так как нагрузки в цепях коллекторов очень малы; электрическое поле в базе отсутствует; не учитывается статическая емкость эмиттера; пренебрегается влиянием поверхностной рекомбинации. Эквивалентная схема токового переключателя при таких допущениях приведена на рис. 3, где приняты следующие обозначения: r_6 — омическое сопротивление базы, C_D — диффузионная емкость эмиттера, r_9 — сопротивления эмиттера, u_c — напряжение на диффузионной емкости,

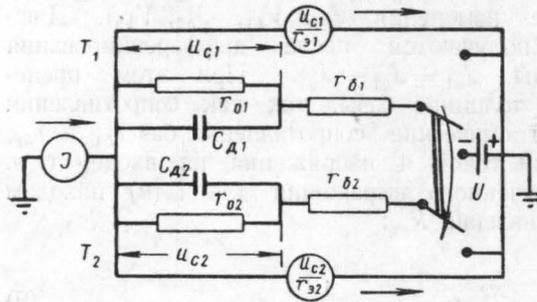


Рис. 3. Эквивалентная схема токового переключателя

Эквивалентная схема токового переключателя при таких допущениях приведена на рис. 3, где приняты следующие обозначения: r_6 — омическое сопротивление базы, C_D — диффузионная емкость эмиттера, r_9 — сопротивления эмиттера, u_c — напряжение на диффузионной емкости,

$$r_0 = \frac{r_\tau r_\gamma}{r_\tau + r_\gamma}, \quad r_\tau = \frac{2r_9}{\omega/L}$$

сопротивление, учитывающее рекомбинацию носителей тока в базе,

$$r_\gamma = r_9 \frac{\gamma}{1-\gamma} \text{ — сопротивление, учитывающее эффективность эмиттера;}$$

J — постоянный ток, задаваемый в эмиттеры; U — напряжение, которое при $t < 0$ было приложено к триоде T_2 , а при $t = 0$ переключается на базу триода T_1 . Индексы 1 относятся к триоде T_1 , а индексы 2 — к триоде T_2 .

В качестве значений параметров r_{91} , r_{92} , C_{D1} и C_{D2} берутся некоторые средние значения, получаемые при усреднении их в диапазоне эмиттерных токов от 0 до J . В результате усреднения r_{91} и r_{92} совпадают в этом случае с сопротивлениями эмиттерных переходов постоянному току J : $J_{91} = r_{910}$, $r_{92} = r_{920}$. Усредненные значения диффузионных емкостей связаны с диффузионными емкостями триодов при протекании через них тока I следующим образом:

$$\bar{C}_{D1} = \frac{C_{D1}|_{J_{91}=J}}{2}, \quad \bar{C}_{D2} = \frac{C_{D2}|_{J_{92}=J}}{2}.$$

Для упрощения уравнения схемы будем считать, что параметры триодов T_1 и T_2 одинаковы и что $r_6 \ll r_0$ (что всегда имеет место для исследуемых триодов).

Итак, составив для схемы рис. 3 систему уравнений и разрешив ее относительно u_{c1} , получим уравнение токового переключателя

$$\frac{d^2 u_{c1}}{dt^2} + \frac{2 + \frac{R_6}{r_{90}}}{R_6 \bar{C}_D} \frac{du_{c1}}{dt} + \frac{2}{r_{90} R_6 \bar{C}_D^2} u_{c1} = \frac{U}{R_6 \bar{C}_D^2} + J. \quad (10)$$

Начальные условия имеют вид

$$u_{C1}|_{t=0} = 0, \quad \left. \frac{du_{C1}}{dt} \right|_{t=0} = \frac{U + Jr_{\varepsilon 0}}{R_6 \bar{C}_A}, \quad (11)$$

где $R_6 = r_{\varepsilon 01} + r_{\varepsilon 02} + R_{\Gamma}$, а R_{Γ} — внутреннее сопротивление источника напряжения U .

Решение уравнения (10) с начальными условиями (11) имеет вид

$$U_{C1} = \frac{U + Jr_{\varepsilon 0}}{2} \left(1 - e^{-\frac{2t}{R_6 \bar{C}_D}} \right), \quad (12)$$

$$J_{K1} = \frac{u_{C1}}{r_{\varepsilon 0}} = \frac{U + Jr_{\varepsilon 0}}{2\varepsilon_0} \left(1 - e^{-\frac{2t}{R_6 \bar{C}_D}} \right). \quad (13)$$

Формула (12) верна лишь до тех пор, пока ток J_{K1} не достигнет значения J . После этого процесс роста J_{K1} прекращается и он остается равным J . В то же время предел, к которому стремится величина напря-

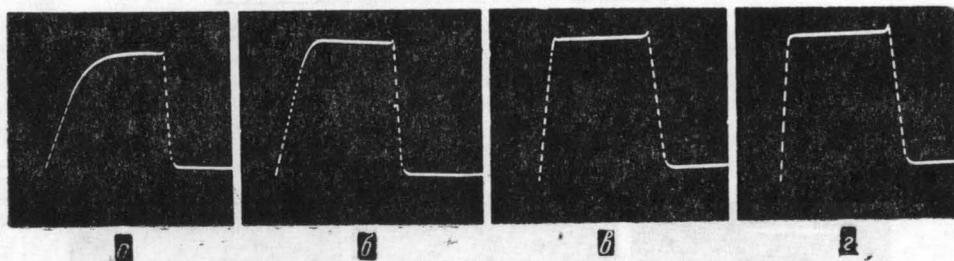


Рис. 4. Зависимость длительности переднего фронта выходного импульса от амплитуды входного напряжения. Длительность меток равна 0,1 мксек. а — $U = 0,1\text{в}$, б — $U = 0,2\text{в}$, в — $U = 0,4\text{в}$, г — $U = 0,6\text{в}$, ток $J = 4\text{ма}$

жения u_{C1} согласно (12); определяется величиной U , т. е. амплитудой входного напряжения. Чем больше эта амплитуда, тем больше скорость нарастания напряжения на диффузионной емкости u_{C1} и тем меньше должна быть длительность изменения тока в триоде T_1 от 0 до J .

Если время достижения током J_{K1} значения J обозначить через t_n , то получаем из выражения (13)

$$t_n = \frac{R_6 \bar{C}_D}{2} \ln \frac{U + Jr_{\varepsilon 0}}{U - Jr_{\varepsilon 0}}. \quad (14)$$

Чем больше U , тем ближе отношение под логарифмом к единице, т. е. тем меньше длительность t_n .

Эта характерная зависимость длительности переднего фронта выходного импульса от амплитуды входного напряжения показана на осциллограммах рис. 4. Видно, что при увеличении амплитуды переключающего сигнала U длительность переднего фронта выходного сигнала уменьшается.

На рис. 5 приведена экспериментальная зависимость длительности переднего фронта от U и теоретическая зависимость, полученная по формуле (14). Значение постоянной времени $\frac{R_6 \bar{C}_D}{2}$ для большей точности определялось по одной из точек экспериментального графика. Кривые дают хорошее совпадение.

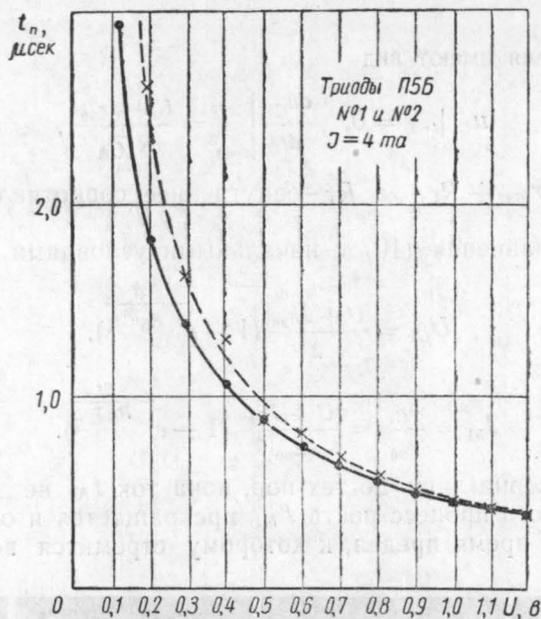


Рис. 5. Теоретическая и экспериментальная зависимость длительности переднего фронта выходного импульса от напряжения U . — — — теоретическая кривая (по формуле (14)), x — экспериментальная кривая

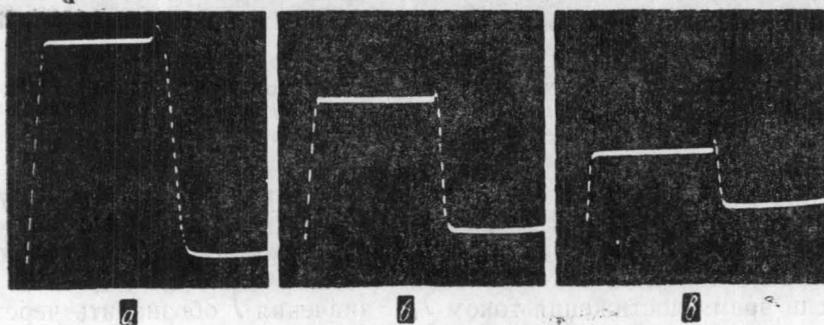


Рис. 6. Зависимость времени переключения от тока J . Длительность меток равна 0,1 мксек. а — $J = 7$ ма, б — $J = 3$ ма, в — $J = 1$ ма.

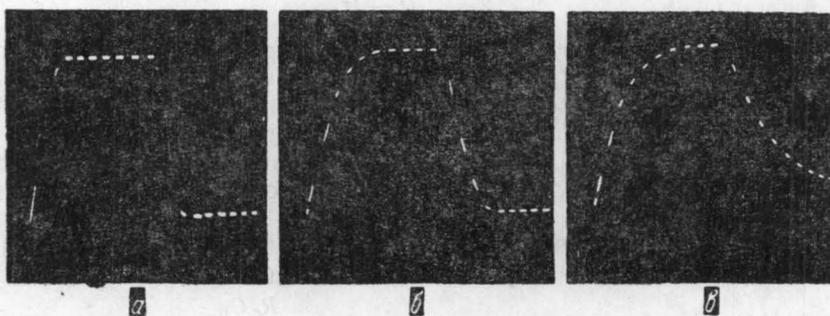


Рис. 7. Зависимость длительности времени переключения от сопротивления $R_с$. Длительность меток равна 1 мксек. а — $R_с = R_1$, б — $R_с = R_2$, в — $R_с = R_3$, $R_1 < R_2 < R_3$

На рис. 6 приведена зависимость времени переключения от тока J при постоянных U и R_6 . С ростом J длительность фронта увеличивается (в основном из-за роста диффузионной емкости C_d).

На рис. 7 показана зависимость длительности процесса переключения от R_6 при постоянных значениях U и J . R_6 искусственно увеличивалось путем введения в цепь базы триода T_2 дополнительных сопротивлений. Длительность переключения растет с увеличением R_6 .

Все осциллограммы и график получены для низкочастотных триодов типа П5Б.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yourke H. S. Trans. I. R. E., CT-4, 236, 1957.
2. Henle R. A., Walsh J. L. Proc. I. R. E., 1252, 1958.
3. Richards R. K. D. Van Nostrand Co. 1957.
4. Лебедев В. И. Сб. «Полупроводниковые приборы и их применение», вып. 5. «Советское радио», стр. 233.
5. Ebers J. J., Moll J. L. Large — Signal Behavior of Junction Transistor; Proc. I. R. E., 42, Nr. 12, 1761, 1954.
6. Попов А. А. Сб. «Полупроводниковые приборы и их применение», вып. 2. «Советское радио», стр. 187.

Поступила в редакцию
29.6 1962 г.

Кафедра
теории колебаний