

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛЕВОМ ТРАНЗИСТОРЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ

А. М. Бобрешов, Г. К. Усков, И. И. Мещеряков, И. С. Коровченко

Воронежский государственный университет

В работе рассматриваются эффекты, возникающие при воздействии нано- и пикосекундных видеоимпульсов на полевые транзисторы с затвором Шоттки (ПТШ). Предложена модель, в которой произведен учет основных характеристик деградации ПТШ. Разработана методика определения параметров модели по экспериментально полученным зависимостям. Показано, что характер поведения тока стока определяется кратковременным эффектом воздействия положительных выбросов напряжения на затворе, увеличивающим ток стока, и действием отрицательных импульсов, уменьшающих этот ток. На основе полученной модели рассчитаны зависимости тока стока от времени во время и после воздействия. Теоретические характеристики хорошо согласуются с экспериментальными. На основе полученных данных рассчитана зависимость изменения коэффициента усиления от времени при наличии импульсного воздействия.

ВВЕДЕНИЕ

В современной радиоаппаратуре микроволнового диапазона для усиления и преобразования СВЧ-сигналов широко используются полевые транзисторы с затвором Шоттки (ПТШ) на основе арсенида галлия (GaAs). На основе таких ПТШ разрабатываются входные малошумящие усилители СВЧ (МШУ), смесители, а также усилители мощности. Известно, что МШУ и смесители входят в число наиболее уязвимых по отношению к воздействию помех элементов радиоаппаратуры [1, 2]. Особенно уязвимы МШУ, поскольку они расположены в радиоприемном тракте сразу после приемной антенны и на них воздействуют все помехи, принятые антенной. Часто эти помехи действуют на МШУ непосредственно, так как в целях повышения чувствительности радиоприемника защитные устройства и фильтры на его входе могут отсутствовать.

В последнее время большое внимание уделяется воздействию видеоимпульсов нано- и субнаносекундной длительности. Такие сигналы являются сверхширокополосными, и даже в присутствии входных фильтров часть спектра все равно попадает на вход транзистора. Энергии сверхкоротких импульсов, может оказаться достаточно как для необратимого вывода из строя полупроводниковых приборов, так и для отказов обратимого типа.

Особый интерес вызывает обратимая деградация транзисторов, под которой понимается ухудшение функциональных параметров транзистора (коэффициент усиления, ток стока транзистора) в результате импульсных воздействий, с последующим медленным восстановлением этих параметров после прекращения воздействия. Этим исследованиям и посвящена эта работа.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

На затвор транзистора, включенного по стандартной схеме с типовыми статическими смещениями, через разделительный конденсатор подавались субнаносекундные импульсы отрицательной и положительной полярности с регулируемой периодичностью.

Степень деградации ПТШ под действием импульсов может оцениваться по изменению величины тока стока I_c . Известно, что ток стока является универсальным параметром, который однозначно связан с толщиной слоя объемного заряда в канале транзистора и, следовательно, с величинами всех параметров транзистора, зависящих от толщины его активного слоя [3]. Следовательно, изменение I_c под действием импульсов относительно статической величины I_{c0} , имеющей место при рабочих смещениях в отсутствие импульсов, отражает глубину деградации функциональных параметров ПТШ, в том числе и основных его параметров — коэффициента усиления и коэффициента шума [4].

Экспериментальная зависимость среднего значения тока стока во время и после воздействия серии отрицательных и положительных видеоимпульсов приведена на рис. 1. Следует отметить, что из-за наличия разделительного конденсатора и других реактивных элементов в схеме экспериментальной установки, в том числе в цепях питания, каждый импульс, создает переходной процесс, в силу чего импульс на входе транзистора не является чисто отрицательным, а сопровождается положительным выбросом, длительность которого может составлять десятки микросекунд. Этот выброс повторяется током стока, искажая картину межимпульсной релаксации по сравнению со случаем чисто отрицательного импульсного воздействия.

Можно предположить, что характер поведения тока стока под импульсным воздействием определяется двумя факторами: кратковременным эффектом воздействия положительных выбросов напряжения на затворе, которые увеличивают ток стока, и накоплением отрицательного заряда в подложке за счет действия основных отрицательных составляющих импульсов,

который уменьшает ток. После прекращения воздействия первый из этих факторов перестает действовать, и изменение тока стока относительно номинального значения определяется только отрицательным зарядом, накопленным в подложке. В результате, прекращение импульсной серии сопровождается скачкообразным падением тока стока, отчетливо видимым на осциллограммах рис. 1.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

В подавляющем большинстве систем схемотехнического проектирования ПТШ описываются с помощью эквивалентных схем на сосредоточенных элементах. Такие модели не учитывают вышеупомянутые эффекты. Для расширения границ применимости таких систем предложено использовать дополнительный блок, подключенный к затвору модели и моделирующей поведение канала транзистора, посредством введения добавочного напряжения на затвор в зависимости от входного воздействия.

Т.к. механизмы влияния положительных и отрицательных импульсов на характеристики

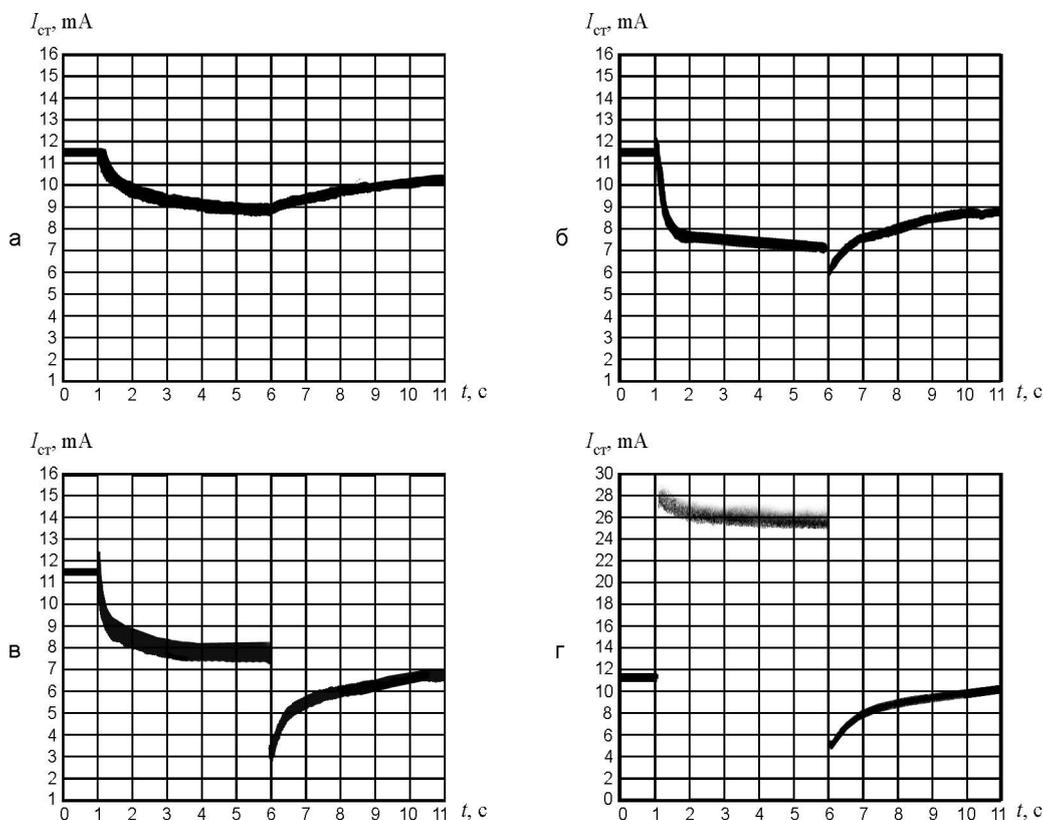


Рис. 1. Экспериментальные осциллограммы тока стока транзистора под воздействием серии отрицательных импульсов: а — $T_{и} = 10$ мс; б — $T_{и} = 1$ мс; в — $T_{и} = 0.1$ мс, под воздействием серии положительных: г — $T_{и} = 0.01$ мс

транзистора различны, предложено использовать два блока, один из которых реагировал бы на отрицательное, а другой на положительное воздействие и суммировать напряжение на их выходах.

Для определения структуры блоков и их параметров в идеальном варианте следует использовать экспериментальные зависимости, полученные под воздействием серии чисто отрицательных и чисто положительных импульсов. В реальном эксперименте такие характеристики достаточно трудно получить. Поэтому, можно использовать те зависимости, для которых выбросы за счет реактивных элементов в схеме экспериментальной установки не оказывают действия.

Таким образом, структура и параметры блока, моделирующего поведение канала ПТШ под воздействием серии отрицательных видеоимпульсов получены по экспериментальной зависимости тока стока для периода следования импульсов 10 мс, минимальным значениям тока стока для периодов следования импульсов 1 мс, 0,1 мс и времени восстановления тока стока до первоначального значения. Модель, описывающую воздействие положительных импульсов, следует определять по значению тока стока непосредственно после начала воздействия.

Для решения данной задачи предложено использовать модель Хаммерштейна совместно с дополнительным нелинейным блоком F_n на выходе. В условиях непрерывного времени модель Хаммерштейна может быть описана следующим выражением:

$$\begin{aligned}
 y(t) &= \int_0^T h_1(\tau) F_1 [x(t - \tau)] d\tau + \\
 &+ \int_0^T h_2(\tau) F_2 [x(t - \tau)] d\tau + \dots + \\
 &+ \int_0^T h_N(\tau) F_N [x(t - \tau)] d\tau = \\
 &= \sum_{n=1}^N \int_0^T h_n(\tau) F_n [x(t - \tau)] d\tau,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где N — порядок нелинейности, T — время памяти, $h_n(t)$ — импульсная характеристика n -ого линейного блока, который связан с передаточной функцией $H_n(z)$ преобразованием Лапласа [5]. Использование модели в вышеописанном виде имеет ряд недостатков. Так для полного описания зависимости необходимо использо-

вать достаточно высокий порядок нелинейности, что сильно усложняет нахождение параметров модели и увеличивает машинное время расчета. Предложено использовать две ветви, первая из которых, моделировала поведение канала транзистора во время воздействия, а вторая — после.

Т. к. деградация тока стока во время воздействия серии отрицательных импульсов имеет экспоненциальную зависимость, то импульсную характеристику первой ветви модели можно выбрать в виде:

$$h_1 = (\tau, a, \alpha) = a \cdot e^{-\alpha\tau}. \tag{2}$$

Процесс восстановления тока стока после импульсного воздействия состоит из двух характерных частей: быстрой и медленной релаксации, которые, как и во время воздействия, так же имеют экспоненциальную зависимость. Поэтому импульсную характеристику второй ветви модели можно выбрать в виде:

$$h_2 = (\tau, b, c, \beta, \gamma) = b \cdot e^{-\beta\tau} + c \cdot e^{-\gamma\tau}. \tag{3}$$

Следует отметить, что время памяти линейного блока с импульсной характеристикой вида (2) и (3) может быть определено выбором коэффициентов α, β, γ . Таким образом, сигналы на выходах линейных блоков можно преобразовать в вид:

$$y_1(t, a, \alpha) = a \int_0^t e^{-\alpha(t-\tau)} x(\tau) \sigma(-x(\tau)) d\tau, \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 y_2(t, b, c, \beta, \gamma) &= b \int_0^t e^{-\beta(t-\tau)} x(\tau) \sigma(-x(\tau)) d\tau + \\
 &+ c \int_0^t e^{-\gamma(t-\tau)} x(\tau) \sigma(-x(\tau)) d\tau,
 \end{aligned} \tag{5}$$

где $x(t)$ — входное воздействие, $\sigma(t)$ — функция Хевисайда.

Входное воздействие (серия отрицательных импульсов) системы может быть описано с помощью функции:

$$x(t) = A \sum_{i=0}^{N_n-1} (\sigma(t - i \cdot T_n) - \sigma(t - i \cdot T_n - \tau_n)), \tag{6}$$

где T_n — период следования импульсов, τ_n — длительность импульса, N_n — число импульсов, A — амплитуда. Так как $X(t)$ отличен от нуля только в интервалах времени t от $i \cdot T_n$ до $i \cdot T_n + \tau_n$, где $i = 0, 1, \dots, N_n - 1$, с учетом (2), (3), (4), (5) напряжение на выходе линейных блоков может быть преобразовано в следующий вид:

$$y_1(t, \tau_n, a, \alpha) = -A \sum_{i=0}^I \int_{t_{i1}}^{t_2} a \cdot e^{-\alpha t} dt, \quad (7)$$

$$y_2(t, \tau_n, b, c, \beta, \gamma) = -A \sum_{i=0}^I \int_{t_{i1}}^{t_2} b \cdot e^{-\beta t} dt - A \sum_{i=0}^I \int_{t_{i1}}^{t_2} c \cdot e^{-\gamma t} dt, \quad (8)$$

где $I = (\sigma(t - T_n) \cdot (\text{int}(t/T_n) - 1) + (N_n - 1) \cdot \sigma(T_n - t))$ — число импульсов прошедших на вход системы за время от 0 до t , int — целая часть числа, $t_1 = t - i \cdot T_n$, $t_2 = t - (i \cdot T_n + \tau_n) \cdot \sigma(t - i \cdot T_n - \tau_n) - t \cdot \sigma(i \cdot T_n + \tau_n - t)$.

Формулы (7), (8) позволяют минимизировать машинное время при вычислении, так как сумма интегралов рассчитывается на порядок быстрее, чем интеграл суммы.

Коэффициенты a, α можно найти минимизировав среднеквадратичную разность значений добавочного напряжения, рассчитанного по экспериментальной характеристике, снятой для большого времени следования импульсов (рис. 1 А) и функции $y_1(t, \tau_n, a, \alpha)$, на протяжении времени от 0 (время начала воздействия) до T_b (время воздействия):

$$g_1(a, \alpha) = \int_0^{T_n} (y_{\text{эсп1}}(t) - y_1(t, 0.01, a, \alpha))^2 dt, \quad (9)$$

где $y_{\text{эсп1}}(t)$ — аппроксимирующая функция добавочного к затвору напряжения под воздействием серии отрицательных видеоимпульсов с периодом следования 10 мс.

В результате оптимизации были получены следующие значения: $a = 1.88 \cdot 10^5$, $\alpha = 1.252$. Функция $y_1(t, \tau_n, a, \alpha)$ моделирует сужение канала транзистора во время воздействия.

Нелинейность F_n определяется исходя из соотношений отрицательных добавок к напряжению затвора, рассчитанным по экспериментально измеренным значениям минимального тока стока, непосредственно после воздействия к теоретически рассчитанным по формулам (7) для различных периодов следования в момент времени T_n :

$$\begin{aligned} F_n(0) &= 0; \\ F_n(y_1(T_b, \tau_{n1}, a, \alpha)) &= y_{\text{эсп1}}(T_b); \\ F_n(y_1(T_b, \tau_{n2}, a, \alpha)) &= y_{\text{эсп2}}(T_b); \\ F_n(y_1(T_b, \tau_{n3}, a, \alpha)) &= y_{\text{эсп3}}(T_b); \end{aligned} \quad (10)$$

где $y_{\text{эсп1}}(T_b)$, $y_{\text{эсп2}}(T_b)$, $y_{\text{эсп3}}(T_b)$ — значения аппроксимирующих функций добавочных напряжений под воздействием серии чисто отри-

цательных видеоимпульсов с периодами следования $\tau_{n1} = 10$ мс, $\tau_{n2} = 1$ мс, $\tau_{n3} = 0.1$ мс непосредственно после снятия воздействия (в момент времени T_b).

Для транзистора 3П325А-2 функция F_n была получена в виде:

$$F_n(x) = -d \cdot (-x)^e \quad (11)$$

с коэффициентами $d = 0.319$, $e = 0.237$.

Можно показать, что при условии

$$y_1(T_b, \tau_n, a, \alpha) = y_2(T_b, \tau_n, b, c, \beta, \gamma) \quad (12)$$

выражение (8) в моменты времени начиная с T_b отличаются от значения $y_1(T_b, \tau_n, a, \alpha)$ множителем $h_2(t - T_b, b, c, \beta, \gamma)$. Следовательно, для функции, описывающей выходное напряжение на выходе второй ветви справедливо равенство:

$$y_2(t, \tau_n, b, c, \beta, \gamma) = y_1(T_b, \tau_n, a, \alpha) \cdot h_2(t - T_b, b, c, \beta, \gamma), \quad \text{при } t > T_b. \quad (13)$$

При этом следует учитывать тот факт, что время релаксации возрастает с уменьшением периода следования. Поэтому предложено ввести зависимость коэффициентов β и γ от значения добавочного напряжения в момент времени окончания воздействия T_b .

$$\beta = \beta_1 \cdot y_1(T_b, a, \alpha)^{\beta_2}, \quad (14)$$

$$\gamma = \gamma_1 \cdot y_1(T_b, a, \alpha)^{\gamma_2}. \quad (15)$$

Коэффициенты b_1, b_2 определяют процесс медленной релаксации и находятся по экспериментальным значениям времени релаксации для различных периодов следования импульсов. Т.е. значение $b \cdot e^{-\beta t}$, при $t = T_b$ должен быть равен 0.

Были получены следующие коэффициенты:

$$\beta_1 = 2.33, \quad \beta_2 = 0.32. \quad (16)$$

Коэффициенты c, b, γ_1, γ_2 можно определить минимизировав среднеквадратичную разность значений добавочного напряжения, рассчитанного по экспериментальным характеристикам, снятым для различных периодов следования (рис. 1 а, б, в) и функции $F_n(y_2(T_b, \tau_n, b, c, \beta, \gamma))$, на протяжении времени от T_b до времени релаксации процесса.

$$\begin{aligned} g_2(c, b, \gamma_1, \gamma_2) &= \int_{T_b}^{T_{p1}} (y_{\text{эсп1}}(t) - y_2(t, 0.01, c, b, \gamma_1 \times \\ &\times y_1(T_b, a, \alpha)^{\gamma_2}, \beta_1 \cdot y_1(T_b, a, \alpha)^{\beta_2}))^2 dt + \\ &+ \int_{T_b}^{T_{p2}} (y_{\text{эсп2}}(t) - y_2(t, 0.001, c, b, \gamma_1 \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times y_1(T_B, a, \alpha)^{\gamma_2}, \beta_1 \cdot y_1(T_B, a, \alpha)^{\beta_2})^2 dt + \\ & + \int_{T_B}^{T_{p3}} (y_{\text{эксп3}}(t) - y_2(t, 0.0001, c, b, \gamma_1 \times \\ & \times y_1(T_B, a, \alpha)^{\gamma_2}, \beta_1 \cdot y_1(T_B, a, \alpha)^{\beta_2}))^2 dt, \end{aligned} \quad (17)$$

где T_{p1}, T_{p2}, T_{p3} времена релаксации тока стока под воздействием серии отрицательных видеоимпульсов с периодами следования $\tau_{и1} = 10$ мс, $\tau_{и2} = 1$ мс, $\tau_{и3} = 0.1$ мс соответственно.

В результате оптимизации были получены следующие значения:

$$b = 0.05; c = 0.95; \gamma_1 = 0.03; \gamma_2 = 0.32. \quad (18)$$

С учетом полученных значений отрицательное добавочное напряжение, как отклик на входное воздействие в виде серии чисто положительных импульсов можно записать в виде:

$$\begin{aligned} y_{\text{отр}}(t) = & F_n(\sigma(t - T_B) \cdot y_1(T_B, \tau, a, \alpha) \times \\ & \times h_2(t - T_B, c, b, \beta, \gamma) + \sigma(T_B - t) \times \\ & \times \sigma(0 - t) \cdot y_1(t, \tau, a, \alpha)). \end{aligned} \quad (19)$$

Для получения зависимости тока стока от времени t необходимо воспользоваться его аппроксимирующей функцией зависящей от напряжения на затворе $I_c(V_3)$, где V_3 равно сумме постоянного напряжения на затворе V_{30} , определяющему режим работы транзистора и добавочному $y_{\text{отр}}(t)$.

На рис. 2 показаны теоретически полученные зависимости тока стока от времени под воздействием серии чисто отрицательных импульсов рассчитанные с использованием формулы (19).

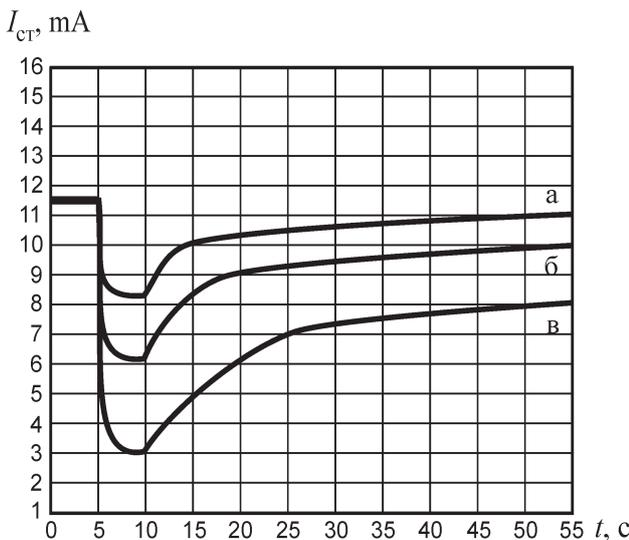


Рис. 2. Расчетные зависимости тока стока от времени под воздействием серии отрицательных импульсов: а. $T_{и} = 10$ мс; б. $T_{и} = 1$ мс; в. $T_{и} = 0.1$ мс;

Как говорилось ранее, воздействие импульсов положительной полярности способствует увеличению тока стока и после снятия воздействия ток стока быстро возвращается к своей статической величине. Модель, описывающую такое воздействие, имеет структуру сходную со структурой первого блока. Т.е. положительные импульсы попадают на вход линейного блока с памятью, имеющего экспоненциальную импульсную характеристику, выход которой соединен с нелинейной функцией, ограничивающей накопление заряда. Таким образом, напряжение на выходе линейного блока, целевую функцию для нахождения коэффициентов и уравнения для нахождения нелинейной функции на выходе, по аналогии с (6), (7), (9), (10) можно записать в виде:

$$y_3(t, \tau_n, d, v) = -A \sum_{i=0}^I \int_{t_1}^{t_2} d \cdot e^{-v \cdot t} dt, \quad (20)$$

$$g_3(d, v) = \int_0^{T_3} (y_{\text{пэксп1}}(t) - y_3(t, 0.01, d, v))^2 dt, \quad (21)$$

$$\begin{aligned} F_n(y_1(T_B, \tau_{и1}, a, \alpha) &= y_{\text{пэксп1}}(0); \\ F_n(y_1(T_B, \tau_{и2}, a, \alpha) &= y_{\text{пэксп2}}(0); \\ F_n(y_1(T_B, \tau_{и3}, a, \alpha) &= y_{\text{пэксп3}}(0), \end{aligned} \quad (22)$$

где $y_{\text{пэксп1}}(0)$, $y_{\text{пэксп2}}(0)$, $y_{\text{пэксп3}}(0)$ — значения аппроксимирующих функций добавочных напряжений под воздействием серии чисто положительных видеоимпульсов с периодами следования $\tau_{и1} = 10$ мс, $\tau_{и2} = 1$ мс, $\tau_{и3} = 0.1$ мс непосредственно в начале воздействия (в момент времени 0). После вычислений были получены следующие параметры:

$$\begin{aligned} F_n(V) = & 0.38(1 - e^{-12.70V}) + 0.62(1 - e^{-0.29V}); \\ d = & 4.38 \cdot 10^5; v = 3.07 \cdot 10^7. \end{aligned} \quad (23)$$

На рис. 3 показаны импульсы, действующие в реальной ситуации на затвор транзистора.

Последовательность положительных выбросов в цепи затвора можно записать в виде:

$$x_n(t) = 0.007 \sum_{i=0}^{N_s-1} e^{-3.07 \cdot 10^7 (t - \tau_n - iT_n)} \sigma(t - i \cdot T_n + \tau_n), \quad (24)$$

где T_n — период следования, τ_n — длительность отрицательного импульса.

В результате добавочное напряжение, с учетом положительных импульсов имеет вид:

$$\begin{aligned} y(t) = & \sigma(T_B - t) y_1(t, \tau_n, a, \alpha) + \\ & + \sigma(t - T_B) y_2(t, \tau_n, b, c, \beta, \gamma) + \\ & + d \int_0^t \tau_n(t, T_n, \tau_n) \cdot e^{-v(t-\tau)} d\tau. \end{aligned} \quad (25)$$

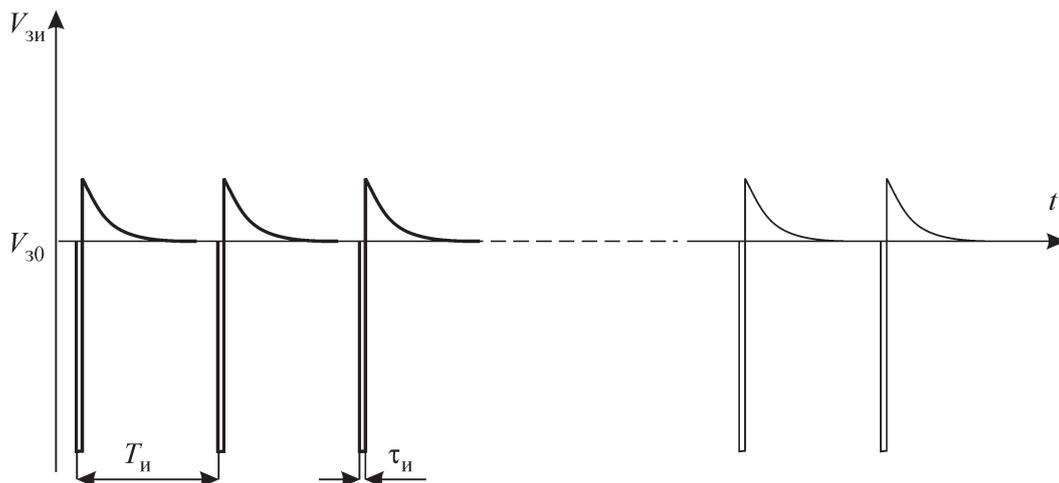


Рис. 3. Напряжение на затворе ПТШ во время воздействия последовательностью отрицательных сверхкоротких импульсов

С учетом (25) зависимость тока стока транзистора от времени примет вид:

$$I = I_c(V_{з0} + y(t)), \quad (26)$$

где $V_{з0}$ — постоянное напряжение затвора, определяющее режим работы транзистора.

Объединив результаты, полученные для серий чисто отрицательных и чисто положительных импульсов, ток стока имеет вид, показанный на рис. 4.

Из графиков видно хорошее совпадение расчетных характеристик полученных по формуле (26) с экспериментальными данными. Следует отметить, что выражение (25) было

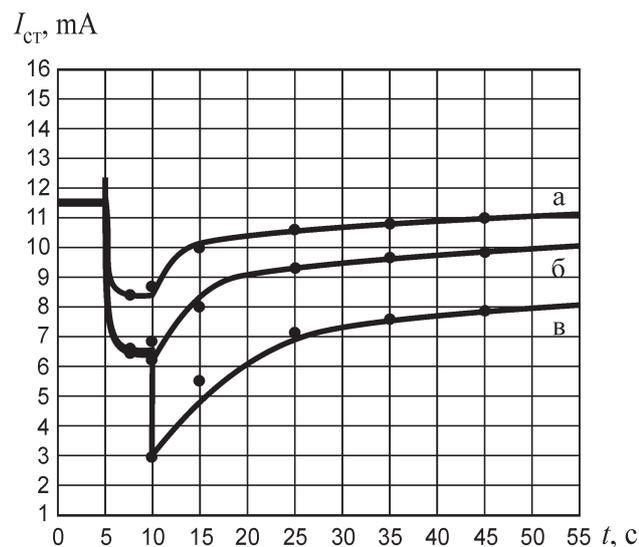


Рис. 4. Расчетные зависимости тока стока от времени под воздействием серии отрицательных импульсов и положительных выбросов (точками показаны экспериментальные значения): а. $T_{и} = 10$ мс; б. $T_{и} = 1$ мс; в. $T_{и} = 0.1$ мс

получено в предположении, что величины тока стока под воздействием отрицательных импульсов определяется двумя факторами противоположного действия: кратковременным эффектом воздействия положительных выбросов напряжения на затворе, которые увеличивают ток стока, и накоплением отрицательного заряда в подложке за счет действия основных отрицательных составляющих импульсов, который уменьшает ток. Таким образом, можно подтвердить вышеизложенное, т.к. модель, параметры которой получены по экспериментальным точкам, где эффекты побочных выбросов отсутствуют, качественно и количественно моделирует ток стока транзистора и в их присутствии.

По полученным расчетным характеристикам тока стока можно рассчитать зависимость коэффициента усиления ПТШ от времени (рис. 5). Из графиков видно, что его минимальное значение достигается непосредственно после окончания воздействия, и с уменьшением периода следования его величина достигает нулевого значения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования получена модель, которая позволяет учесть основную характеристику деградации ПТШ — ток стока. Разработана методика определения параметров модели по экспериментальным характеристикам. Показано, что характер поведения тока стока определяется поведением канала транзистора во время импульсного воздействия и длительным процессом восстановления после.

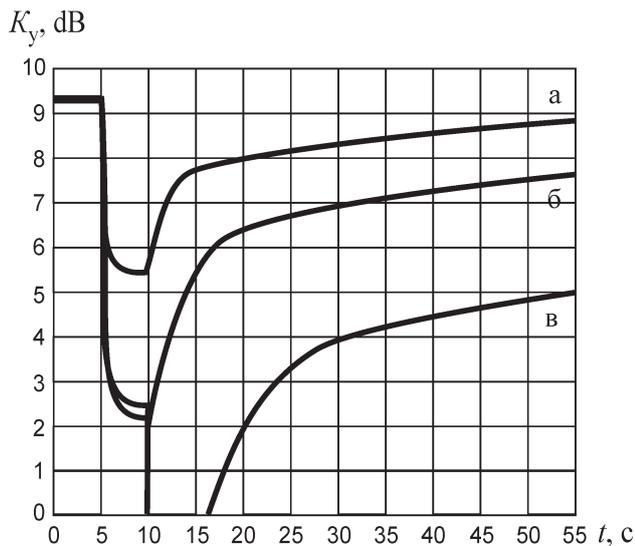


Рис. 5. Расчетные зависимости коэффициента усиления от времени под воздействием серии отрицательных импульсов и положительных выбросов: а. $T_n = 10$ мс; б. $T_n = 1$ мс; в. $T_n = 0.1$ мс;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипин В.В., Годовицын В.А., Громов Д.В. и др. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы // Зарубежная радиоэлектроника, 1995. — № 1. — С. 37—53.
2. Баранов И.А., Обрезан О.И., Роний А.И. Стойкость твердотельных модулей СВЧ к кратковременным электроперегрузкам // Обзоры по электронной технике. Сер. 1, СВЧ-техника. — М.: ЦНИИ «Электроника», 1997. — 111 с.
3. Itoh T., Yanai H. Stability of Performance and Interfacial Problems in GaAs MESFET's // IEEE Transactions on Electron Devices, 1980. — V. ED-27. — № 6. — P. 1037—1045.
4. James D.S., Dormer L. A study of high power pulsed characteristics of low-noise GaAs MESFET's // IEEE Trans., 1981, — V. MTT-29. — № 12. — P. 1298—1310.
5. Korenberg M. J., Paarmann L. D. Orthogonal Approaches to Time-series Analysis and System Identification // IEEE Signal Processing Magazine. July 1991. V. 8, № 3, P. 29—43.