

А.Е. ПОЕДИНЧУК, канд. физ-мат. наук, с.н.с., Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины им. А. Я. Усикова, Харьков

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ БИООБЪЕКТОВ

The analysis of picosecond volt impulses shapers made on tunnel diodes is carried out.

Проведено аналіз формувачів імпульсів напруги пікосекундної довжини на тунельних діодах.

Проведен анализ формирователей импульсов напряжения пикосекундной длительности на туннельных диодах.

Введение. Создание импульсных рефлектометров для измерения диэлектрической проницаемости биологических объектов в широком частотном диапазоне 0...300 ГГц связано с использованием импульсов перепада напряжения $\tau_{\phi}=10...15$ пс. Анализ характеристик выпускаемых промышленностью туннельных диодов [1] показывает, что для построения подобного генератора импульсов оказывается наиболее предпочтительным использование быстродействующих германиевых туннельных диодов, время переключения τ которых должно соответствовать вышеуказанному значению τ_{ϕ} .

Цель, задание исследования. Целью и задачей исследования является установление зависимости длительности фронта импульса формирователей импульсов на туннельных диодах от напряжения и плотности тока.

Основной текст. Рассмотрим формирователь импульсов напряжения на туннельном диоде, принципиальная и эквивалентная схемы которого приведена на рис. 1 и 2.

Пусть на резистивно-емкостный преобразователь (рис. 2) действует внешний сигнал управления, который отображается в электрической модели системы в виде источника тока $I_1(x, t)$. Процессы в преобразователе при $u(0, x) = 0$ и $u(0, l; t) = 0$ однозначно описываются уравнением [2]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - R_1 C_1 \frac{\partial u}{\partial t} - R_1 \phi_1(u) = R_1 I_1, \quad (1)$$

где $\varphi_1(u) = \sum_{n=1} a_n u^n$, $x \in [0, l]$, $t \in [0, \infty]$.

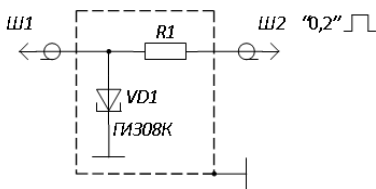


Рис. 1. Принципиальная схема формирователя импульсов.

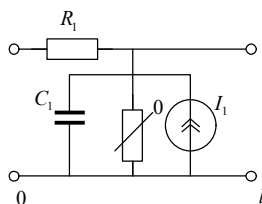


Рис. 2. Эквивалентная схема формирователя импульсов.

Решение уравнения (1) будем искать с помощью метода итераций [2]. После преобразований компонента u , имеет вид:

$$u_l(x, t) = R_1 \int_0^l \int_0^t I_1(\xi; \tau) G'_{1u}(x, \xi, t - \tau) d\xi d\tau, \quad (2)$$

где G'_{1u} – ядро первого порядка:

$$G'_{1u} = \frac{2}{R_1 C_1 l} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[\exp - \left\{ \left[\left(\frac{\pi n}{l} \right)^2 \cdot \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{a}{C_1} \right] t \right\} \sin \frac{\pi n x}{l} \cdot \sin \frac{\pi n x}{l} \right]. \quad (3)$$

Ядро второго порядка находится с учетом (3) при $U_2 = 0$ ($g_2 = 0$),

$I_2(\xi; \tau) = a_2 u_1^2(\xi; \tau) (h_2 = a_2 \delta(t - \tau_1) \delta(t - \tau_2))$ имеет вид:

$$G'_{2u} = a_2 \int_0^l \int_0^l G'_{1u}(x, \xi; t - \tau_1) G'_{1u}(\xi, \xi_1; \tau - \tau_1) G'_{1u}(\xi, \xi_2; \tau - \tau_2) d\tau d\xi, \quad (4)$$

где $\tau \geq \tau_2$, $\tau \geq \tau_1$ при этом компонента:

$$u_2(x, t) = R_1^2 \int_0^l \int_0^l \int_0^t \int_0^t I_1(\xi_1; \tau_1) I_1(\xi_2; \tau_2) \times \\ \times G'_{2u}(x, \xi_1; \xi_2, t - \tau_1, t - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 d\xi_1 d\xi_2 \quad (5)$$

Методика получения уравнения для отыскания третьих и более высоких порядков ядер аналогична приведенной, при этом каждое последующее приближение будет зависеть от предыдущих.

На рис. 3 показано преобразование формы колебания гармонического типа и характеристика преобразования $\Phi_x[V_0]$ (характеристика N-типа) полученные с помощью ПК из решения уравнения (4).

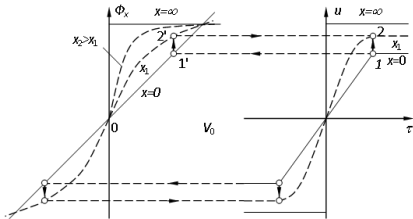


Рис. 3. Графическое преобразование формы колебания гармонического типа.

Например, $x = 0$ т. 1 на профиле колебания $u(0, \tau)$ соответствует т. 1' на характеристике преобразования $\Phi_x[V_0]$, т. 1' движется вверх, достигая при $x \rightarrow \infty$ предельного значения. Для нахождения т. 2 на колебании $u(x_1, \tau)$ необходимо из т. 2' провести горизонтальную линию до пересечения с перпендикуляром 1-2. Аналогичные построения проводятся для других точек на колебании $u(0, \tau_0)$.

В результате описанного процесса формируется прямоугольный сигнал с амплитудой u_1 (рис. 4, а), соответствующий переключению из одного устойчивого состояния равновесия в другое (рис. 4, б). Длительность формируемого импульса t_u определяется длительностью входного импульса на уровне $u = u_0$.

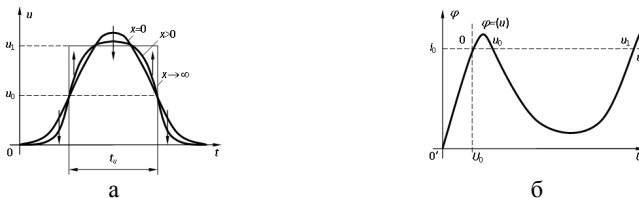


Рис. 4. Характеристики формирования прямоугольного импульса.

В рассмотренной системе форма стационарной волны $x \rightarrow \infty$ не зависит от формы возбуждающего колебания $u(t)$ и тонкой структуры характеристики $\varphi(u)$, которая, однако, при рассмотрении переходного режима ($x > 0$) имеет существенное значение [3].

Оценим время переключения формирователя импульсов на ТД. С рис. 1 и рис. 2 видно, что основным элементом, определяющим длительность фронта генерируемых импульсов, является туннельный ди-

Функция преобразования $\Phi_x[V_0] = u_x$ является суммой первых трех членов ряда Тейлора, аппроксимирующего функцию $\Phi_x[V_0]$, при $V_0(t) = u(0, t)$.

Стрелками на обоих рисунках пояснен принцип графического построения формы колебания при $x \geq 0$ по известной характеристике преобразования.

од. При работе туннельного диода предельное время нарастания импульса напряжения U на нагрузке R_n полупроводникового прибора, имеющего дрейфовый промежуток (базу) W , ограничивается максимальной дрейфовой скоростью в полупроводниках $v_{EM} \approx 10^7$ см·с⁻¹, емкость прибора C_n и предельно допустимой плотностью тока j_M , проходящего через него. Время установления на нагрузке прибора при этом определяется соотношением [3]:

$$t = \frac{W}{v_{EM}} + \frac{2,2\varepsilon\varepsilon_0 U}{Wj_M}. \quad (6)$$

Из (6) ясно, что стремление ограничить ширину базы прибора сопровождается ростом емкостного влияния на время нарастания формируемого импульса.

Из (6) следует, что существует оптимальное соотношение, при котором для заданных требований наблюдается минимум фронта импульса:

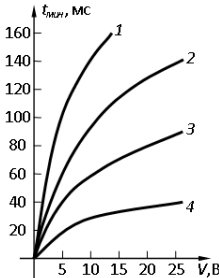


Рис. 5. Зависимость длительности фронта импульса от формируемого напряжения и плотности тока проходящего через прибор

ближается к 10 пс.

$$t_{\min} = 3 \left[\frac{\varepsilon\varepsilon_0 U}{v_{EM} j_M} \right]^{1/2}. \quad (7)$$

На рис. 5 показана, рассчитанная на ПК, зависимость длительности фронта импульса от формируемого напряжения и плотности тока проходящего через прибор для следующих значений: 1 – $j_M = 5 \cdot 10^2$ А/см²; 2 – $j_M = 5 \cdot 10^3$ А/см²; 3 – $j_M = 5 \cdot 10^2$ А/см²; 4 – $j_M = 10^4$ А/см².

Выводы. При $U = 10$ В, $j_M = 10^4$ А/см² длительность фронта импульсов t_{\min} составит 30 пс, а при $U = 1$ В, при той же плотности тока, предельное время длительности фронта при-

Список литературы: 1. Полупроводниковые диоды. Параметры, методы измерений / Под ред. Горюнова Н.Н., Носова Ю.Р. – М.: Сов. радио, 1988. – 304 с. 2. Пупков К.А., Капалин В.И., Юценко А.С. Функциональные ряды в теории нелинейных систем. – М.: Наука, 1976. – 448 с. 3. Викулкин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Сов. радио, 1980. – 296 с.

Поступила в редколлегию 13.02.2012
Рецензент д.т.н., проф. Рудаков В.В.