

05:06

Динамика домена в диоде Ганна в цепи с резистивной нагрузкой

© С.И. Домрачев, А.А. Кузнецов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
410026 Саратов, Россия
E-mail: KuznecovAA@info.sgu.ru

(Поступило в Редакцию 13 октября 1999 г. В окончательной редакции 25 июля 2000 г.)

Методом компьютерного моделирования исследуются параметры импульсов тока доменного режима диода Ганна в зависимости от напряжения питания и величины нагрузки. Результаты сравниваются с аналитической теорией. Уточняются границы применимости аналитических выражений. В рамках принятой модели минимальная длительность импульса и время формирования домена получены при нулевой нагрузке и напряжении питания в 1.25 раз больше порогового значения.

Введение

Диод Ганна в режиме генерации коротких импульсов тока обладает рядом ценных свойств, которые обуславливают перспективность его применения в быстродействующих устройствах электроники и оптоэлектроники [1–4]. В частности, генераторы сверхкоротких импульсов тока на диоде Ганна позволяют получать импульсы тока большой амплитуды (несколько десятков ампер) длительностью в десятки–сотни пикосекунд на низкоомной нагрузке.

Для практических приложений важно знать, каким образом амплитуда, форма и временные параметры импульсов тока зависят от нагрузки (внешней цепи) и напряжения питания и каковы оптимальные условия для получения импульсов минимальной длительности. Имеется достаточно много публикаций, посвященных исследованию переходных процессов в диоде Ганна. По-видимому, наиболее подробно вопросы динамики доменов исследованы в работах [2,5,6]; в [7] содержится также небольшой критический обзор более ранних публикаций по динамике домена. Однако эти работы не свободны от недостатков и требуют уточнений. Например, в обычно цитируемых работах [5,6] переходное время формирования домена определяется как время установления напряжения на домене, в то время как для практики важно знать время установления тока через образец. При напряжении источника, существенно превышающем пороговое для эффекта Ганна, последняя величина может быть заметно меньше первой из-за насыщения тока при больших напряжениях на домене. Не определены также области применимости аналитических выражений, полученных в [2,5] для зависимости времени формирования домена от сопротивления нагрузки и напряжения питания.

В данной работе исследуется зависимость параметров импульсов тока, характеризующихся полной длительностью импульса τ_w , длительностью фронта τ_r , среза τ_d в режиме стационарных колебаний, а также зависимость времени установления тока τ_s в режиме одиночных импульсов от

величины питающего напряжения и резистивной нагрузки. Все вычисления проведены для модели конкретного образца диода Ганна, параметры которой выбирались в соответствии с параметрами реального диода. Напряжение питания и величина нагрузки варьировались в диапазонах, соответствующих отсутствию ударной ионизации в реальном образце.

Описание модели и метода вычислений

Численное моделирование динамики заряда и тока проводилось для образцов *n*-GaAs длиной $l = 100 \mu\text{m}$ и параметрами материала $\mu_0 = 0.8 \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, $D = 200 \text{ cm}^2/\text{s}$, $V_s = 0.85 \cdot 10^5 \text{ m/s}$, $E_0 = 4 \cdot 10^5 \text{ V/m}$. Данный набор феноменологических параметров соответствовал характеристикам диодов, применявшихся в [3]. Расчеты проводились в рамках локально-полевой одномерной модели [4], включающей в себя уравнение для полного тока

$$\varepsilon \varepsilon_{00} \left(\frac{\partial E}{\partial t} + V(E) \frac{\partial E}{\partial x} - D \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} \right) + q \left(V(E) n_0(x) - D \frac{d n_0}{d x} \right) = J(t), \quad (1)$$

где $n_0(x) = n_d f(x)$ — равновесная концентрация электронов, D — коэффициент диффузии, ε — диэлектрическая проницаемость, совместно с уравнением для внешней цепи

$$J(t) = \frac{U_0 - \int_0^L E(x, t) dx}{S \cdot R_n}, \quad (2)$$

где S — площадь образца, U_0 — напряжение питания, R_n — сопротивление нагрузки.

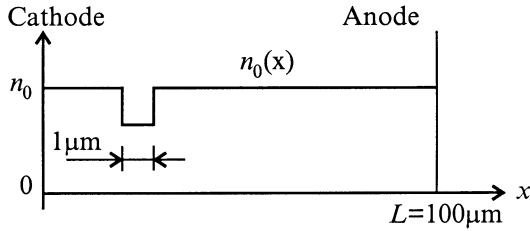


Рис. 1. Профиль легирования диода Ганна.

Зависимость скорости электронов от поля (поле-скоростная характеристика) аппроксимировалась известным выражением [8]

$$V(E) = \frac{\mu_0 E + V_s (E/E_0)^4}{1 + (E/E_0)^4}, \quad (3)$$

где E_0 — нормирующее поле, V_s — скорость насыщения, U_0 — напряжение питания, μ_0 — подвижность в слабом поле.

Применение локально-полевой модели, в рамках которой скорость электронов считается мгновенной функцией поля, для анализа переходных процессов длительностью в десятки пикосекунд не совсем правомерно. Однако в данном случае оно оправдано тем, что нас интересуют не абсолютные значения длительностей импульсов, а их относительные изменения в зависимости от величины нагрузки и напряжения питания. По этой же причине в модели образца (рис. 1) не учитываются контактные неоднородности, а граничные условия задаются в виде

$$\frac{\partial E}{\partial x}(0) = \frac{\partial E}{\partial x}(L) = 0, \quad E(x, 0) = \frac{U_t}{L}, \quad (4), (5)$$

где U_t — пороговое напряжение эффекта Ганна, L — длина образца.

Возникновение доменов инициировалось вводом ”зарубки” — скачка равновесной концентрации электронов у катода величиной около 10%. Как показали расчеты, изменение величины зарубки в диапазоне 5–10% мало влияло на результаты вычислений. Более того, вычисленные значения длительности токовых импульсов весьма близки к экспериментально наблюдавшимся [3]. Для численного решения системы уравнений (1) и (2) удобно ввести безразмерные переменные $X = x/l_0$, $T = t/\tau_0$, $V_1 = V/V_0$, $E_1 = E/E_0$, где единица скорости $V_0 = \mu_0 E_0$, единица времени $\tau_0 = (\varepsilon \varepsilon_0)/(qn_d \mu_0)$ и единица длины $l_0 = V_0 \tau_0$. В безразмерной форме система уравнений (1), (2) принимает вид

$$\frac{\partial E}{\partial T} = -V_1 \frac{\partial E_1}{\partial X} + c \frac{\partial^2 E_1}{\partial X^2} - f V_1 + J_1 + c \frac{d}{d} \frac{f}{X}, \quad (6)$$

$$J_1 = \frac{R_0}{R_n} \left(\frac{U}{E_0 L} - \frac{1}{X_{\max}} \int_0^{X_{\max}} E_1 dX \right), \quad (7)$$

где X_{\max} — безразмерная длина диода, $f = (n(x))/n_d$ — профиль легирования диода, $c = (D\tau)/l_0^2$ — безразмерная диффузия, $R_0 = L/(en_0 \mu_0 S)$ — сопротивление

образца в слабом поле, $J_1 = J/(qn_0 V_0)$ — нормированная плотность тока.

Указанная система аппроксимировалась неявной консервативной абсолютно устойчивой разностной схемой, полученной интегро-интерполяционным методом [9,10]. На сетке $x = ih$, $t = j\tau$ имеем

$$\begin{aligned} \frac{E_i^{j+1} - E_i^j}{\tau} = & - \frac{(E_{i+1} - E_{i-1})^{j+1} V_i^{j+1}}{2h} \\ & + c \frac{(E_{i+1} - 2E_i + E_{i-1})^{j+1}}{h^2} \\ & - f_i \cdot V_i^{j+1} + J_1^j + c \frac{(f_{i+1} - f_{i-1})}{2h}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для нахождения поля E_i^{j+1} на $j+1$ временном слое система нелинейных разностных уравнений (8) приводится к итерационному виду (s — номер итерации)

$$A_i^s E_i^{s+1} - C_i^s E_i^{s+1} + B_i^s E_{i+1}^{s+1} = -F_i^s, \quad (9)$$

где коэффициенты A , B , C получаются из (8) и имеют вид

$$A_i^s = \frac{c\tau}{h^2} + \frac{\tau}{2h} V_i(E_i^s), \quad B_i^s = \frac{c\tau}{h^2} - \frac{\tau}{2h} V_i(E_i^s),$$

$$C_i^s = 1 + \frac{2c\tau}{h},$$

$$F_i^s = E_i^j + \tau \left(J_1^j + \frac{c}{2h} [f_{i+1} - f_{i-1}] - f_i V(E_i^s) \right).$$

Система линейных уравнений (9) решалась относительно E_i^{s+1} методом прогонки [10] с учетом граничных и начальных условий (4) и (5). На нулевой итерации E_i^s полагается равным E_i^j и после двух итераций E_i^{j+1} полагается равным E_i^{s+1} . Шаг сетки выбирался из условий сходимости вычислений и приемлемого времени счета и составлял $\tau = 0.2$ и $h = 0.5$.

Результаты расчетов и их анализ

Режим стационарных автоколебаний. На рис. 2 приведены зависимости длительности доменного импульса тока от величины зарубки для ряда сопротивлений нагрузки, из которых видно, что для наших расчетов целесообразно выбирать величину зарубки около 10%, т.е. на плоском участке кривых. При исследовании влияния сопротивления нагрузки напряжение смещения поддерживалось на пороговом уровне (или в заданное число m раз больше порогового) согласно выражению:

$$U = m U_t \left(1 + \frac{R_n}{R_t} \right), \quad (10)$$

где

$$R_t = \frac{E_t L}{en_0 V(E_t) S}$$

— сопротивление образца при пороговом напряжении, $E_t = U_t/L$.

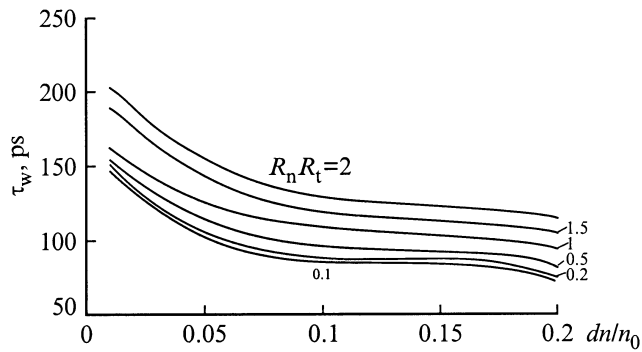


Рис. 2. Зависимость длительности импульса в режиме стационарных колебаний от сопротивления активной нагрузки и величины зарубки на профиле легирования U согласно (10); $m = 1$.

Зависимость параметров импульсов тока в режиме стационарных автоколебаний (т.е. для 2-го и последующих доменных циклов) от сопротивления нагрузки приведены на рис. 3, *a* ($m = 1$) и *b* ($m = 1.5$). Здесь же для качественного сравнения представлены результаты аналитического приближения

$$\tau_w = \tau_{0w} \sqrt{\left(1 + \frac{R_n}{R_0}\right)},$$

где τ_{0w} — длительность импульса при $R_n = 0$, совмещенные с расчетными кривыми в точке $R_n = 0$.

На рис. 3, *b* приведена зависимость параметров импульсов от сопротивления R_n при фиксированном напряжении питания $U = 2.5U_t$. Видно, что при поддержании напряжения на пороговом уровне (или в m раз больше) все параметры импульса монотонно растут с увеличением сопротивления нагрузки. Это объясняется увеличением постоянной времени заряда-разряда домена, пропорциональной емкости домена и сопротивлению нагрузки [2]. Монотонный характер зависимости объясняется тем, что в этом случае при любых R_n домены формируются в одинаковых условиях, когда напряжение на образце равно mU_t и, следовательно, начальная емкость домена неизменна. Сравнение рис. 3, *a* и *b* показывает, что аналитические зависимости хорошо совпадают с результатами численного расчета при пороговом напряжении, а с ростом напряжения на диоде расхождение между ними увеличивается. При фиксированном напряжении источника (рис. 3, *b*) временные параметры импульса в основном слабо зависят от нагрузки, при малой ее величине, но при больших R_n резко возрастают. Последнее объясняется тем, что при значительных сопротивлениях происходит перераспределение напряжения между нагрузкой и диодом, смещение на нем становится ниже порогового и происходит срыв колебаний.

Зависимость параметров импульсов тока от напряжения питания в режиме стационарных колебаний представ-

влена на рис. 4, *a* ($R_n = 0.01R_t$) и *b* ($R_n = 0.5R_t$). Из последней зависимости видно, что если длительность фронта и среза импульса монотонно увеличивается с ростом напряжения, то полная длительность импульса сначала несколько уменьшается, а затем монотонно нарастает. При анализе переходных процессов следует учесть, что формирование первого и всех последующих доменов происходит в разных условиях. Для первого домена образец является однородным (в рамках принятой модели), а на динамику последующих влияет предыдущий домен. С увеличением напряжения смещения влияние предыдущего домена сказывается сильнее, т.е. значительную часть периода колебаний тока в образце присутствуют два домена. Как указано в работе [6], домен уходящий в анод, играет роль резистивной нагрузки для формирующегося дипольного слоя. Сопротивление этой нагрузки растет с увеличением напряжения смещения, что и приводит к увеличению длительности среза и полной длительности импульса.

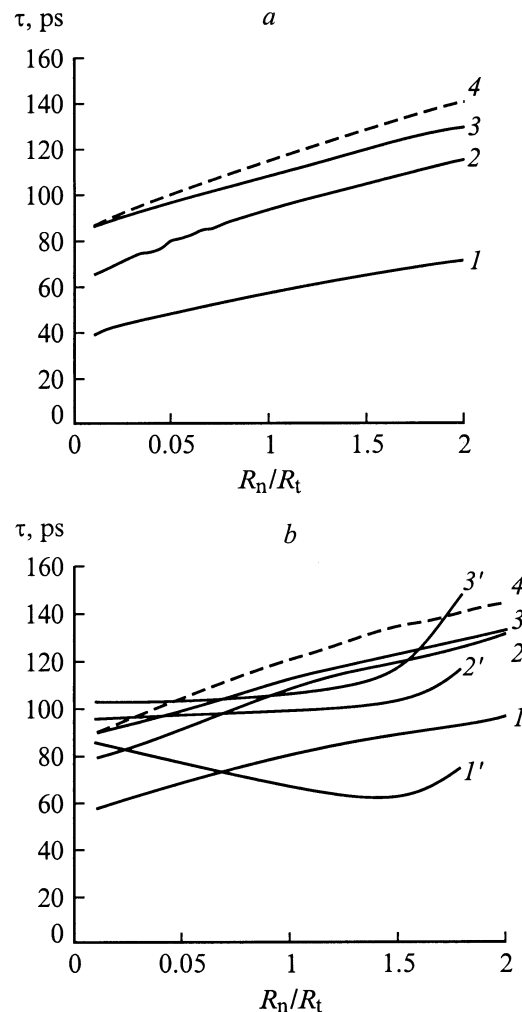


Рис. 3. Зависимости параметров импульса от сопротивления активной нагрузки U согласно (10), а также при $m = 1$ и фиксированном напряжении питания: 1 — τ_d , 2 — τ_r , 3 — τ_w , 4 — $\tau_w = \tau_{0w}(1 + R_n/R_t)^{1/2}$ (*a*); при $m = 1.5$ и фиксированном напряжении питания $U = 2.5U_t$: 1' — τ_d , 2' — τ_r , 3' — τ_w (*b*).

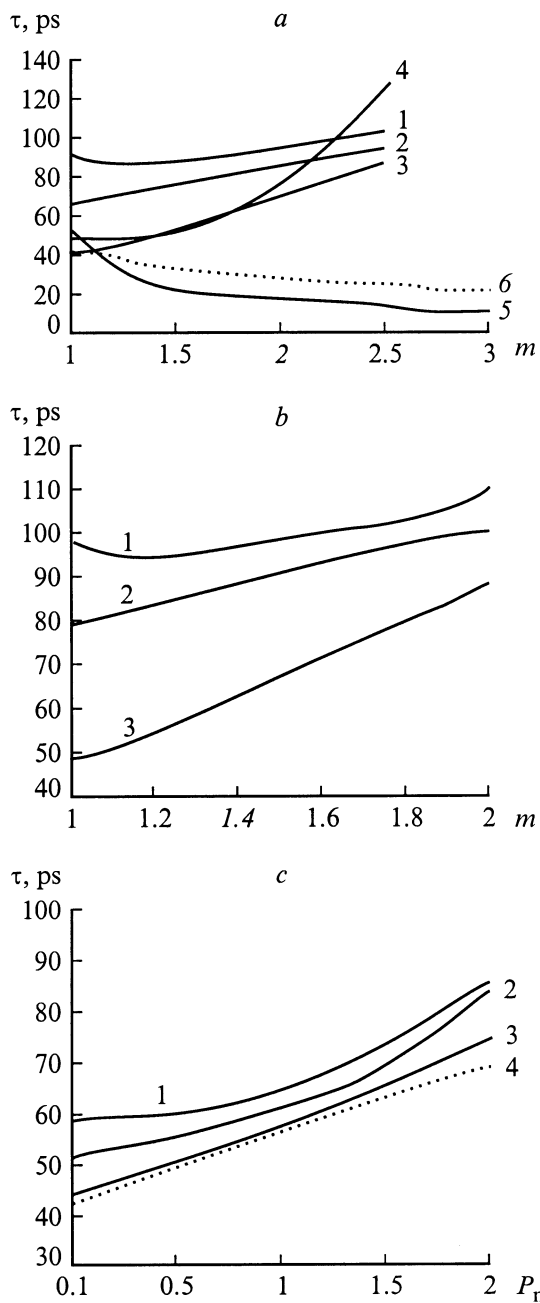


Рис. 4. *a, b* — зависимости параметров импульса от напряжения питания при сопротивлении нагрузки $R_n = 0.01R_t$ и $0.5R_t$ соответственно: 1 — τ_w , 2 — τ_r , 3 — τ_d , 4 — τ_s , 5 — τ_c , *b* — аналитическая оценка времени формирования домена; *c* — зависимость времени установления тока от сопротивления нагрузки и величины зарубки легирования при $m = 1$; dn/n_0 : 1 — 0.02, 2 — 0.1, 3 — 0.4, 4 — аналитическая оценка времени формирования домена.

Расчетные зависимости тока от времени для различных значений приложенного напряжения даны на рис. 5, *a* и *b*. Форма тока зависит от закона нарастания напряжения источника. На рис. 5, *a* напряжение задано нарастающим экспоненциально с постоянной

времени 50 ps, а на рис. 5, *b* оно задается ступенчатой функцией.

Режим одиночных импульсов. Как пояснялось ранее, переходный процесс в диоде Ганна целесообразно характеризовать временем установления тока τ_s . За него принимается интервал времени от включения питания до момента, когда ток через диод превышает ток насыщения на величину, равную 1/10 от разности порогового тока и тока насыщения. Все вычисления были проведены для случая ступенчатого нарастания напряжения источника. Расчетная зависимость времени установления от сопротивления нагрузки приведена на рис. 4, *c* для $m = 1$. На том же рисунке для сравнения приведена аналитическая кривая оценки времени формирования домена, построенная по формуле (4.7.28), приведенной в [2]. Как видно, результаты аналитического и численного расчетов хорошо согласуются, особенно для больших величин зарубки. Последнее связано с тем, что при выводе формулы (4.7.28) не учитывался малосигнальный участок нарастания домена.

Зависимость времени установления тока от напряжения питания приведена на рис. 4, *a* для $R_n = 0.01R_t$. Здесь же приведен результат аналитической оценки. Ход аналитической зависимости в области высоких напряжений качественно не согласуется с расчетной кривой. И в случае первого, и для последующих доменов все характеризующие импульс временные параметры нарастают с увеличением напряжения. Таким образом, выражение из [2] для постоянной времени формирования домена можно применять лишь при небольшом напряжении на диоде, так как при его выводе было использовано

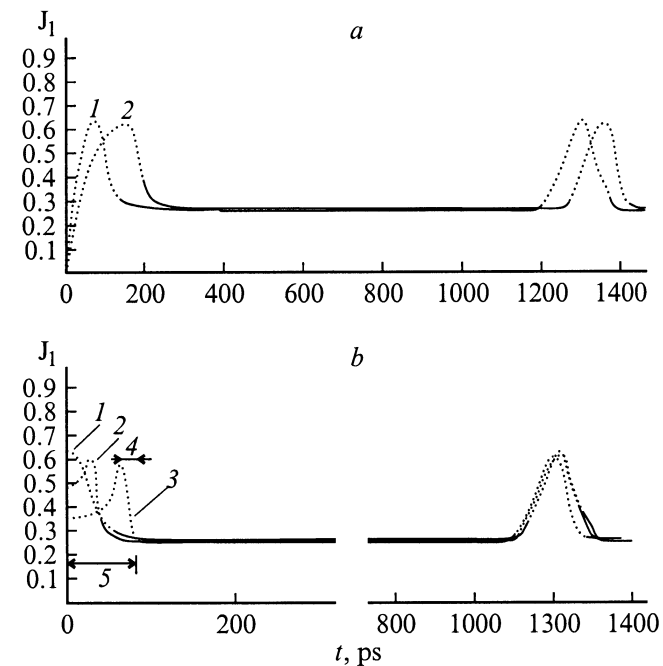


Рис. 5. *a* — форма импульсов тока через диод при постоянной времени источника 50 ps; $m = 1$ (1), 1.5 (2); *b* — при ступенчатом нарастании напряжения источника; m : 1 — 1, 2 — 1.5, 3 — 2; 4 — τ_s , 5 — τ_c .

предположение $V(E_r) = \mu_0 E_r$, справедливое только при остаточном поле E_r , меньшем порогового. В этой связи необходимо заметить, что в [6] приводятся неправомерные в общем случае рассуждения, объясняющие эффект ускорения процесса формирования домена с ростом напряжения, предсказываемый аналитическими выражениями из работ [2,5] тем, что при больших напряжениях на образце зарядка емкости домена происходит большим током и домен проводит меньше времени в состоянии с большей емкостью. Эти рассуждения некорректны, так как не учитывают насыщения скорости носителей заряда при больших полях. Эффект ускорения формирования доменов с ростом напряжения проявляется лишь в уменьшении времени спада тока τ_c от порогового до уровня насыщения (рис. 5, *b*). В этом случае предположение $V(E_r) = \mu_0 E_r$ корректно и, как видно из рис. 4, *a*, аналитическая формула качественно правильно описывает ход кривой времени спада тока. Количественные расхождения объясняются, во-первых, эффектом насыщения тока (аналитическая формула оценивает время установления по напряжению) и, во-вторых, тем, что в больших полях форма домена в переходном процессе формирования существенно отличается от формы стационарного домена, что противоречит аналитическим упрощающим предположениям.

Из приведенных соображений нетрудно качественно объяснить форму импульса в переходном процессе формирования домена и зависимость времени установления тока от напряжения питания. Если напряжение питания ненамного превышает пороговое значение, то предположения аналитической теории [5] справедливы и она правильно описывает формирование домена. При больших напряжениях питания процесс формирования домена можно разбить на два этапа. На первом этапе поле во всем образце больше порогового и ток через диод мал. По мере формирования домена поле вне домена уменьшается и ток через диод растет (рис. 5, *b*). Из-за насыщения поле-скоростной характеристики разность скоростей электронов в формирующемся домене и вне его уменьшается с ростом напряжения питания, что и приводит к увеличению времени нарастания тока с ростом напряжения питания (рис. 5, *b*). На втором этапе, когда ток и остаточное поле в диоде E_r становятся меньше пороговых величин, справедлива теория [5] и время спада тока уменьшается из-за уменьшения емкости домена с ростом напряжения питания. При относительно малых напряжениях питания преобладает эффект уменьшения емкости домена, а при больших — увеличение времени нарастания тока из-за насыщения скорости носителей. Время формирования минимально, когда эти эффекты уравнивают друг друга.

Заключение

В данной работе исследована динамика дипольного домена в диоде Ганна с резистивной нагрузкой. Вычисления показывают, что длительность импульсов тока при

поддержании напряжения на пороговом уровне монотонно увеличивается с ростом сопротивления нагрузки и хорошо описывается приближенной формулой

$$\tau_w = \tau_{0w} \sqrt{\left(1 + \frac{R_n}{R_0}\right)},$$

где τ_{0w} — длительность импульса при $R_n = 0$.

При постоянном напряжении источника питания параметры импульса слабо меняются с ростом сопротивления нагрузки, но при дальнейшем увеличении R_n длительность импульса растет, а затем колебания срываются. Зависимости параметров импульса от напряжения в общем случае немонотонны. С ростом напряжения питания длительность импульса вначале несколько уменьшается, достигая минимального значения при $U/U_t = 1.25$, а затем увеличивается. Показано, что аналитические оценки времени формирования домена справедливы только в полях вблизи порогового значения. В отличие от предсказаний аналитической модели с ростом приложенного к образцу напряжения время установления тока и формирования домена не уменьшается, а растет; уменьшается только время спада тока от порогового значения до насыщения. Результаты расчетов показывают, что минимальная длительность времени установления (в рамках принятой модели) получается при напряжении питания также в 1.25 раз больше порогового и при нулевом значении сопротивления нагрузки. Результаты данной работы могут найти применение при разработке мощных ганновских генераторов импульсов пикосекундной длительности.

Список литературы

- [1] Костылев С.А., Гончаров В.В., Соколовский И.И., Челябин А.В. Полупроводники с объемной отрицательной проводимостью в СВЧ полях: электронные процессы и функциональные возможности. Киев: Наукова думка, 1987. 144 с.
- [2] Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия. М.: Мир, 1991. 632 с.
- [3] Домрачев С.И., Алавердян С.А., Скороходов В.Н. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 5. С. 74–77.
- [4] Левинштейн М.Е., Пожела Ю.К., Шур М.С. Эффект Ганна. М.: Сов. радио, 1975. 288 с.
- [5] Шур М.С. // ФТП. 1973. Т. 7. Вып. 6. С. 1178–1183.
- [6] Левинштейн М.Е., Симин Г.С. // ФТП. 1979. Т. 13. Вып. 5. С. 903–911.
- [7] Симин Г.С. // ФТП. 1974. Т. 8. Вып. 5. С. 1028–1029.
- [8] Н. Thim. // J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. N 8. P. 3897–3905.
- [9] Наянов В.И., Потапов С.К., Сафонова М.А. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1983. Вып. 5. С. 28–31.
- [10] Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1972. 736 с.