

УДК 621.385

## КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА РЕЛАКСАЦИОННОГО ТИПА НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР С ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫМ ПЕРЕХОДОМ

*Богатов Н. М.<sup>1,3</sup>, Григорьян Л. Р.<sup>2</sup>, Куликов О. Н.<sup>3</sup>*

OSCILLATORY SYSTEM OF RELAXATION TYPE ON THE BASE SEMICONDUCTOR STRUCTURES WITH SURFACE-BARRIER JUNCTION

Bogatov N. M., Grigoryan L. R., Kulikov O. N.

In this paper we suggest the equivalent circuit of semiconductor structure, with help of which the analytical expression for the period of current and voltage oscillations has been obtained. We investigated the influence of surface-barrier junction contact capacity type on duration of separate phases of a current passing through the semiconductor structure. We obtained correlation between chemical composition of the semiconductor used for manufacturing semiconductor structure samples and frequency of current and voltage oscillations.

Keywords: semiconductor structure, surface-barrier junction.

### Введение

Широкое применение в радиоэлектронике получили колебательные системы релаксационного типа с использованием элементов, обладающих нелинейными вольтамперными характеристиками S-типа. При использовании полупроводниковых структур с поверхностно-барьерным переходом условия генерации тока и напряжения могут быть реализованы в едином полупроводниковом кристалле. При воздействии на поверхностно-барьерный переход сильных электрических полей ( $\sim 10^6$  В/см), создаваемых источником электрического напряжения, обнаружено возбуждение релаксационных колебаний тока и напряжения в цепи колебательной системы [1–5]. Для объяснения наблюдаемого процесса предложена теоретическая модель [3] управления внешним электрическим полем высотой потенциального барьера на границе контакта металл-полупроводник. Показано, что при воздействии электрического поля из-за процессов обмена носителями заряда (электронами) между поверхностными энергетическими уровнями и зонами проводимости метал-

ла, валентной зоной и зоной проводимости полупроводника изменяется высота поверхностного энергетического барьера.

Применение полупроводниковых структур с поверхностно-барьерным переходом в качестве активного функционального устройства для практических целей сдерживается отсутствием теоретической модели, позволяющей описать процессы протекания тока в цепи образца и форму возникающих релаксационных колебаний тока и напряжения.

Цель настоящей работы — разработка теоретической модели колебательной релаксационной системы, содержащей в своей цепи полупроводниковую структуру с поверхностно-барьерным переходом, и объяснение с её помощью экспериментальных закономерностей, характеризующих колебательные процессы в таких системах.

Полупроводниковая структура рассматривается как система, разделенная на поверхностно-барьерный переход и базовую область. Эквивалентная схема поверхностно-барьерного перехода состоит из нелинейного сопротивления  $R_S$ , характеризуемого S-образной вольтамперной характеристикой,

<sup>1</sup>Богатов Николай Маркович, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой физики и информационных систем Кубанского государственного университета; e-mail: bogatov@phys.kubsu.ru.

<sup>2</sup>Григорьян Леонтий Рустемович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики и информационных систем Кубанского государственного университета; e-mail: leonmezon@mail.ru.

<sup>3</sup>Куликов Олег Николаевич, соискатель кафедры физики и информационных систем Кубанского государственного университета; e-mail: oleg\_kulik@mail.ru.

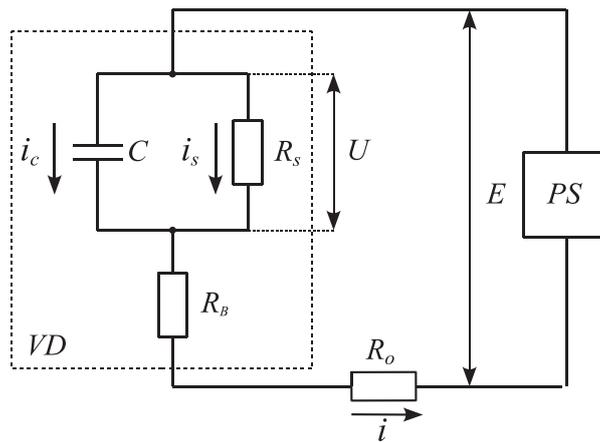


Рис. 1. Эквивалентная схема генератора на основе полупроводниковой структуры с поверхностно-барьерным переходом

и нелинейной емкости  $C$ . Включение в схему нелинейного сопротивления основывается на экспериментальных данных и технологических приемах использованных для изготовления полупроводниковых структур [6]. Базовой области на схеме соответствует линейное сопротивление  $R_B$ .

Общий вид эквивалентной схемы колебательной релаксационной системы приведен на рис. 1. Она состоит из полупроводниковой структуры с поверхностно-барьерным переходом (блок VD), блока электрического питания (блок PS) и нагрузочного сопротивления  $R_O$ .

### 1. Модель колебательной релаксационной системы на основе полупроводниковых структур с поверхностно-барьерным переходом

Уравнение токов для эквивалентной схемы колебательной релаксационной системы имеет следующий вид:

$$i = i_C + i_S, \quad (1.1)$$

где  $i$  — полный ток, протекающий через полупроводниковую структуру;  $i_S$  — ток, протекающий через нелинейный элемент;  $i_C$  — ток, протекающий через емкость.

Ток через полупроводниковую структуру так же может быть определен выражением

$$i = \frac{E - U}{R}, \quad (1.2)$$

где  $E$  — напряжение электрического питания, создаваемое блоком VD;  $U$  — электрическое напряжение на нелинейном сопротивлении и на нелинейной емкости,  $R = R_O + R_B$ .

Зависимость тока от напряжения через нелинейную емкость может быть описана формулой

$$i_C = \frac{C(U)dU}{dt}, \quad (1.3)$$

где  $t$  — время.

С учетом соотношений (1.1)–(1.3), уравнение состояния для эквивалентной схемы будет

$$\frac{C(U)dU}{dt} = \frac{E - U}{R} - \varphi(U), \quad (1.4)$$

где  $\varphi(U)$  — функция, описывающая S-образную вольтамперную характеристику поверхностно-барьерного перехода, зависимость  $\varphi(U)$  определена экспериментально в [6].

Если выполняется условие

$$[1 + R\varphi'(U)] < 0, \quad (1.5)$$

то из (1.4) следует, что функция  $i_C(U)$  возрастает [7, 8].

Анализ уравнения состояния (1.4), описывающего режим автоколебаний в колебательной релаксационной системе на основе полупроводниковых структур с поверхностно-барьерным переходом, выполнен с привлечением математического аппарата теории цепей [9].

На рис. 2 приведен фазовый портрет, характеризующий множество состояний системы, описываемой уравнением (1.4).

Точка O — пересечение нагрузочной прямой, описываемой уравнением (1.2), с вольтамперной характеристикой  $\varphi(U)$  нелинейного сопротивления  $R_S$  на участке отрицательного дифференциального сопротивления

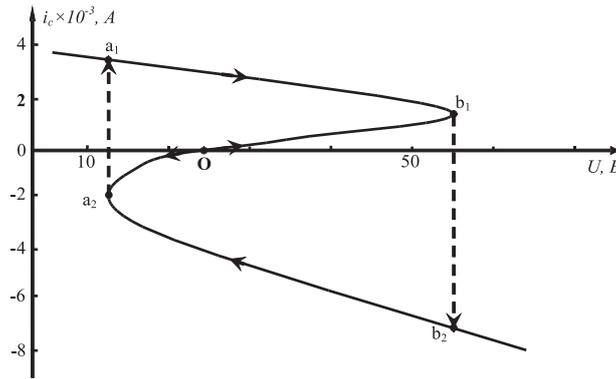


Рис. 2. Фазовый портрет колебательной системы

ния. Точка  $O$  является точкой неустойчивого равновесия. Из состояния, описываемого точкой  $O$ , система может перейти в точки  $a_2$  и  $b_1$ , которые являются особыми точками. Выход системы из точки  $O$  может быть произведен благодаря действию случайной малой флуктуацией какого-либо электрического параметра. В полупроводниках такими флуктуациями могут быть шумовые процессы. В точках  $a_2$  и  $b_1$  производная тока по напряжению испытывает разрыв, система скачком переходит из  $a_2$  и  $a_1$ , а из  $b_1$  в  $b_2$ . Возможность таких скачков тока в радиотехнических цепях теоретически обоснована в [7, 8]. Дальнейшее изменение тока и напряжения на нелинейном сопротивлении будет происходить по траектории  $a_2$ – $a_1$ – $b_1$ – $b_2$ – $a_2$ .

Длительности отдельных фаз изменения напряжения на полупроводниковой структуре в соответствии уравнением (1.4) определяются

$$t = \int_U \frac{RC(U)dU}{E - U - R\varphi(U)}, \quad (1.6)$$

где пределами интегрирования являются величины напряжений в точках  $a_1$  и  $b_1$ , либо  $a_2$  и  $b_2$ .

Участок фазовой кривой  $a_1$ – $b_1$  описывает систему в непроводящем состоянии. В этом случае напряжение на нелинейном сопротивлении и емкости возрастает. Емкость поверхностно-барьерного перехода на данном участке фазовой кривой определяется соотношением [10, 11]

$$C = C_1 = \frac{C_0 \sqrt[3]{U_0}}{\sqrt[3]{U_0 - U}} = S_C \sqrt[3]{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 e n}{2(U_0 - U)}}, \quad (1.7)$$

где  $C_0$  — емкость контакта в равновесном состоянии, при отсутствии внешнего элек-

трического напряжения,  $U_0$  — высота потенциального барьера в контакте в равновесном состоянии,  $z$  — показатель степени, принимающий значения для различных типов переходов (резкий, плавный и др.) от 2 до 3,  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая постоянная,  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость полупроводника,  $n$  — концентрация носителей заряда (электронов),  $e$  — элементарный заряд электрона,  $S_C$  — площадь контакта металл-полупроводник.

Участок фазовой кривой  $a_2$ – $b_2$  описывает состояние системы в ситуации с высокой проводимостью. В этом случае напряжение на поверхностно-барьерном переходе убывает. Емкость поверхностно-барьерного перехода на рассматриваемом участке фазовой кривой определяется током, протекающим через полупроводниковую структуру, и может быть рассчитана по формуле [10, 11]

$$C = C_2 = \frac{e}{kT} i \tau, \quad (1.8)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — термодинамическая температура,  $\tau$  — время жизни носителей заряда (электронов).

Величина тока через полупроводниковую структуру с поверхностно-барьерным переходом, определяется материальными параметрами полупроводника — концентрацией электронов  $n$  и их подвижностью  $\mu_n$ . Эти два параметра входят в выражения для базового сопротивления  $R_B$

$$R_B = \frac{w}{e \mu_n n S_B} = \rho \frac{w}{S_B}, \quad (1.9)$$

где  $w$  — длина базы,  $\rho$  — удельное сопротивление полупроводника.

Период колебаний процесса определяется соотношением

$$T_o = \tau_1 + \tau_2, \quad (1.10)$$

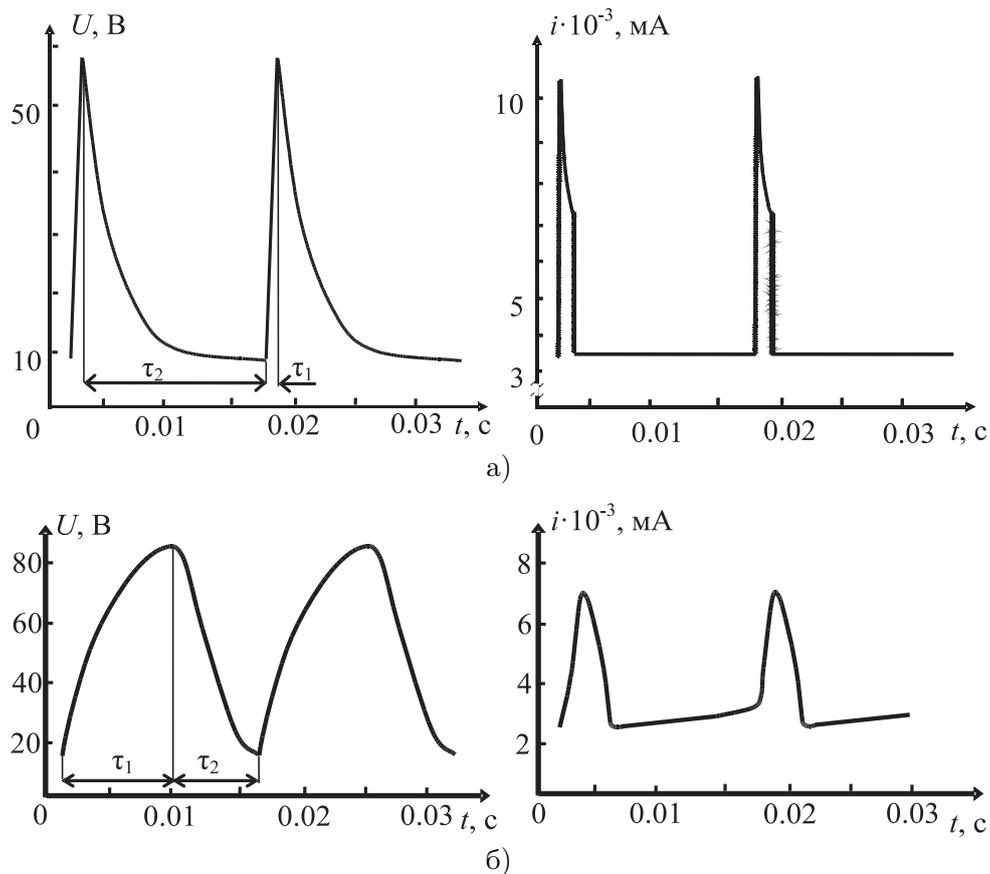


Рис. 3. Теоретические (а) и экспериментальные (б) временные зависимости напряжения и тока

где  $\tau_1$  — длительность возрастания напряжения на поверхностно-барьерном переходе ( $a_1$ – $b_1$ ),  $\tau_2$  — длительность убывания напряжения на поверхностно-барьерном переходе ( $a_2$ – $b_2$ ). Длительность характерных временных интервалов  $\tau_1$  и  $\tau_2$  в соответствии с (1.6) зависит от типа емкости контакта металл-полупроводник — барьерной (1.7) или диффузионной (1.8), соответственно.

## 2. Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования

На рис. 3а приведены результаты моделирования колебаний тока и напряжения при  $E \geq 60$  В с использованием выражений (1.4)–(1.9). Для сравнения на рис. 3б представлены экспериментальные осциллограммы зависимости напряжения и тока через нагрузочное сопротивление от времени, полученные на германиевых точечных диодах. Период колебаний рассчитанных и экспериментальных зависимостей  $U(t)$ ,  $i(t)$  совпадает.

Длительности возрастания  $\tau_1$  и спада  $\tau_2$  напряжения на нелинейном сопротивлении рассчитывались для разных значений  $E$  с помощью выражения (1.6) с подстановкой соотношений (1.7), (1.8).

Экспериментальная и расчетная зависимости  $\tau_1$  и  $\tau_2$  от  $E$  для кремниевых транзисторных структур приведены на рис. 4 и 5, соответственно.

Расчетная зависимость  $\tau_1(E)$  качественно совпадает с экспериментальной. Несоответствие теории эксперименту при больших значениях  $E$  ( $E \geq 8$  В) связывается нами с тем, что соотношение (1.6) получено для емкости идеального контакта металл-полупроводник. На практике получают контакты, содержащие пространственные дефекты, наличие которых зависит от технологии изготовления полупроводниковых структур.

Расхождение расчетной зависимости  $\tau_2(E)$  от экспериментальной может быть объяснено изменением величины отрицательного дифференциального сопротивления в сторону его уменьшения в связи с разогревом полупроводниковой структуры. При увеличении внешнего электрического напряже-

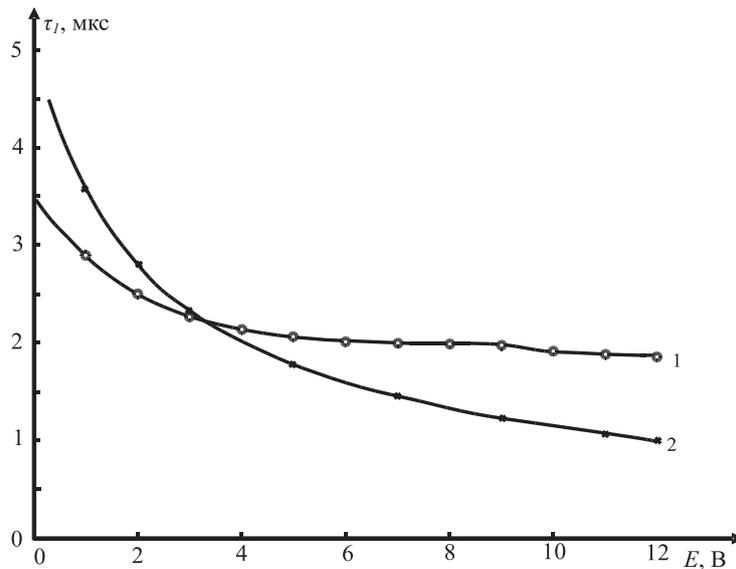


Рис. 4. Зависимость длительности  $\tau_1$  возрастания напряжения  $U$  от напряжения смещения  $E$ : 1 — эксперимент, 2 — расчет

ния на полупроводниковой структуре происходит уменьшение напряжения в точке  $b_2$  и, как следствие, уменьшается емкость поверхностно-барьерного контакта.

Для проверки применимости модели колебательной релаксационной системы на основе полупроводниковых структур с поверхностно-барьерным переходом проведена оценка удельного сопротивления базового слоя полупроводниковой структуры. Расчеты выполнены с помощью уравнения (1.4), формул (1.7) и (1.9) с использованием экспериментально измеренных значений амплитуды, частоты колебаний напряжения и геометрических размеров поверхностно-барьерного перехода и базовой области.

Для упрощения процедуры численного расчета в уравнении (1.4) сделана замена

$$K = \frac{dU}{dt} \rightarrow \frac{\Delta U}{\Delta t}, \quad (2.1)$$

где  $\Delta U$  — амплитуда колебаний напряжения,  $\Delta t$  — длительность импульса напряжения, определяемая по частоте  $\nu$  возникающих колебаний напряжения,  $\Delta t = 1/\nu$ .

С учетом (1.7), (2.1) уравнение (1.4) примет следующий вид:

$$\left( \frac{S_C K}{\sqrt{U_0 - U}} \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0}{2\mu_n \rho}} + \varphi(U) \right) \times \left( \rho \frac{w}{S_B} + R_O \right) = E - U. \quad (2.2)$$

Исходные данные [6] и решение уравнения (2.2)  $\rho_r$  приведены в таблице. Удельное со-

противление базового слоя полупроводниковых структур оценивалось для напряжений  $E \geq 80$  В и амплитуды колебаний 60 В, результаты приведены в таблице.

Видно, что удельные сопротивления, как для германия, так и для кремния, полученные в результате расчетов  $\rho_r$  и экспериментально измеренные  $\rho_e$  близки по значениям.

## Выводы

Предложена эквивалентная схема генератора на основе полупроводниковой структуры с поверхностно-барьерным переходом. Построена математическая модель колебательной релаксационной системы для этой структуры, описывающая форму экспериментально наблюдаемых колебаний тока и напряжения. Получено аналитическое выражение для периода колебаний тока и напряжения. Дано удовлетворительное качественное и количественное объяснение экспериментально наблюдаемых временных зависимостей длительности отдельных фаз изменений напряжения  $U$  и тока  $i$  в полупроводниковой структуре от напряжения электрического питания  $E$ . На примере структур, изготовленных из Si и Ge, выявлена взаимосвязь между материалом полупроводника и частотой колебаний тока и напряжения. По экспериментальным данным — амплитуде и частоте колебаний напряжения, получено значение удельного сопротивления базового слоя полупроводниковой структуры с

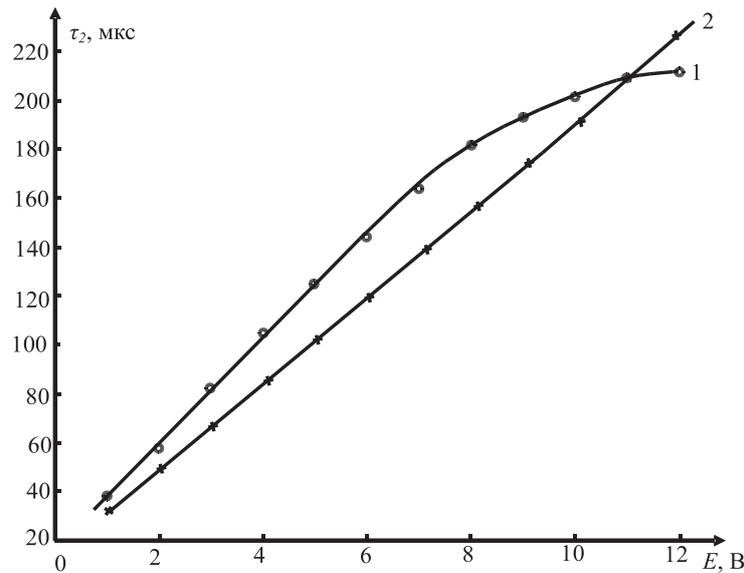


Рис. 5. Зависимость длительности  $\tau_2$  спада напряжения  $U$  от напряжения смещения  $E$ :  
1 — эксперимент, 2 — расчет

Сравнительная характеристика полупроводниковых структур

	$\rho_e$ , Ом·м	$S_C$ , м <sup>2</sup>	$w$ , мкм	$\nu$ , Гц	$\rho_r$ , Ом·м
Ge	0,25	$10^{-6}$	880	$5 \cdot 10^5$	0,225
Si	0,075	$10^{-6}$	800	$5 \cdot 10^4$	0,072

поверхностно-барьерным переходом, близкое к реальному.

### Литература

1. Косман М. С., Муравский Б. С. Возникновение колебаний тока в кремнии при высоких импульсных напряжениях // ФТТ. 1961. Т. 3. № 11. С. 2504–2506.
2. Муравский Б. С. Исследование аномальных характеристик точечных контактов с поверхностью германия и кремния // ФТТ. 1962. Т. 9. № 4. С. 2485–2489.
3. Муравский Б. С., Кузнецов В. И., Фризен Г. И., Черный В. Н. Исследование кинетики поверхностно-барьерной неустойчивости тока // ФТП. 1972. Т. 6. С. 2114–2122.
4. Муравский Б. С., Куликов О. Н. Рекомбинационная неустойчивость тока в эпитаксиальных  $p^+$ - $n$ -структурах с локально введенными в  $n$ -область примесными атомами и определение параметров глубоких центров на ее основе // ФТП. 2003. Т. 37. В. 4. С. 393–397.
5. Муравский Б. С., Рубцов Г. П., Григорьян Л. Р., Куликов О. Н. Электрофизические и фотоэлектрические свойства транзисторных структур с распределенным эмиттером и функциональные приборы на их основе // Журнал радиоэлектроники 2000 № 10. <http://jre.cplire.ru/win/oct00/2/text.html>.
6. Муравский Б. С. Неравновесные процессы и токовая неустойчивость в контактах металл-полупроводник: Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук, 1983. Л. 413 с.
7. Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний. М. Наука. 1981. 915 с.
8. Мигулин В. В., Медведев В. И., Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Основы теории колебаний. М.: Наука. 1978. 392 с.
9. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Высшая школа. 1984. 528 с.
10. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. 2 т. М.: Мир. 1984. 912 с.
11. Видулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Советское радио. 1980. 296 с.

Ключевые слова: полупроводниковая структура, поверхностно-барьерный переход.