

Возникновение режима отрицательного дифференциального сопротивления и переключения в туннельном диоде под действием внешнего СВЧ сигнала

© Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Н.В. Угрюмова, С.Б. Вениг, В.Е. Орлов

Саратовский государственный университет,
410026 Саратов, Россия

(Получена 22 ноября 1999 г. Принята к печати 26 ноября 1999 г.)

Теоретически описан экспериментально обнаруженный эффект возникновения режима отрицательного дифференциального сопротивления и переключения в туннельном диоде под действием внешнего СВЧ сигнала. Выяснены причины существования диапазонов напряжений смещений на диоде и уровней мощности СВЧ сигнала, в которых наблюдается обнаруженный эффект.

Введение

Воздействие сильного СВЧ поля оказывает существенное влияние на характеристики токопереноса в структурах на основе $p-n$ -переходов [1–3]. В работах [4,5] было экспериментально обнаружено и теоретически описано явление изменения вида вольт-амперных характеристик (ВАХ) туннельных диодов под действием СВЧ сигнала высокого уровня. В частности, было установлено, что вследствие появления термотока горячих носителей заряда и детекторного эффекта при воздействии СВЧ мощности пиковое значение тока на прямой ветви ВАХ туннельного диода уменьшается и при определенном уровне СВЧ сигнала исчезает участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС). При использовании туннельного диода, запитываемого от источника постоянного напряжения, в качестве активного элемента автогенератора это приводило к срыву автоколебаний [6].

Использование в цепях питания туннельных диодов нагрузочных сопротивлений или последовательное соединение нескольких туннельных диодов при воздействии СВЧ сигнала вызывает перераспределение напряжений по постоянному току между элементами электрической схемы [7]. В частности, такой процесс может приводить к возникновению в туннельном диоде под действием внешнего СВЧ сигнала режима ОДС и переключения при напряжениях питания на диоде, существенно меньших пикового значения. Исследование такой возможности и составило содержание настоящей работы.

Эксперимент

В экспериментах исследовалось влияние СВЧ сигнала высокого уровня мощности на вид низкочастотных вольт-амперных характеристик туннельных диодов типа 1И308, в цепи питания которых было включено последовательное постоянное сопротивление 50 Ом.

Туннельный диод размещался с помощью держателя в резонаторе на основе отрезка короткозамкнутого волновода сечением $7.2 \times 3.4 \text{ мм}^2$. Частота действующего излучения составляла 38 ГГц.

Для уменьшения влияния теплового разогрева диодной структуры диод запитывался от источника переменного напряжения с частотой 100 Гц.

Величина напряжения питания V_d положительной полярности, подаваемого на последовательно соединенные туннельный диод и сопротивление, выбиралась таким образом, чтобы в отсутствие СВЧ сигнала напряжение смещения на туннельном диоде V_0 не превышало пикового значения V_p .

На рис. 1 представлены экспериментальные ВАХ туннельного диода, измеренные при различных уровнях мощности СВЧ сигнала и одном и том же интервале напряжений V_d .

Как следует из представленных результатов, при увеличении уровня СВЧ мощности до определенного значения напряжение смещения V_0 на туннельном диоде резко увеличивалось, и рабочая точка попадала сначала на участок отрицательного дифференциального сопроти-

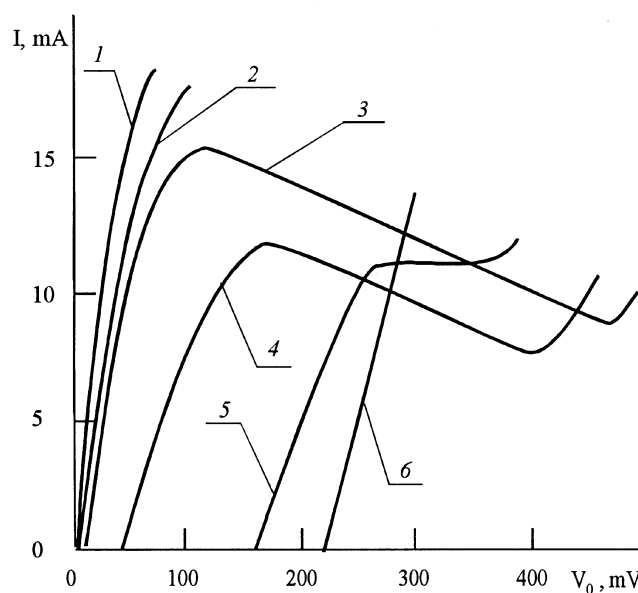


Рис. 1. Экспериментальные ВАХ туннельного диода при различных уровнях мощности СВЧ сигнала. $V_d = 900 \text{ мВ}$. $P_0, \text{ мВт}$: 1 — 0, 2 — 50, 3 — 100, 4 — 400, 5 — 800, 6 — 1200.

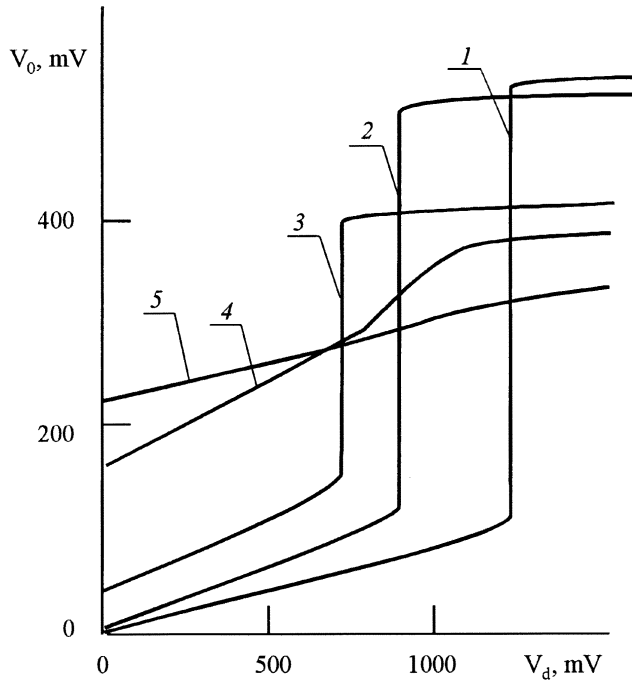


Рис. 2. Экспериментальные зависимости величины напряжения смещения на туннельном диоде V_0 от напряжения питания V_d при различных уровнях мощности СВЧ сигнала. P_0 , мВт: 1 — 0, 2 — 100, 3 — 400, 4 — 800, 5 — 1200.

вления, а затем на диффузионную ветвь ВАХ туннельного диода, т.е. под действием внешнего СВЧ сигнала наблюдалось возникновение в туннельном диоде режима ОДС и режима переключения.

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости напряжения смещения V_0 на туннельном диоде от величины напряжения V_d , позволяющие сделать вывод о том, что напряжение переключения, при котором туннельный диод из низкоомного состояния практически скачком переходит в высокоомное, уменьшается с ростом мощности СВЧ сигнала, подаваемого на туннельный диод.

При последующем значительном увеличении уровня воздействующего СВЧ сигнала участок ОДС исчезал, ВАХ туннельного диода становилась близкой к линейной (рис. 1, кривая б).

Модель, используемая при расчете

При моделировании поведения туннельного диода, включенного в СВЧ резонатор, использовалась эквивалентная схема, представленная на рис. 3. Элементы эквивалентной схемы моделируют полупроводниковую структуру диода в виде параллельного соединения емкости C и нелинейного сопротивления R [3]. Корпус диода моделируется элементами L_k и C_k , а отрезок волновода — входной проводимостью в плоскости включения диода Y_0 .

Предполагалось, что сопротивление базы диода не зависит от величины тока и значительно меньше сопротивления $p-n$ -перехода R до напряжений смещения, равных контактной разности потенциалов V_k . При $V > V_k$ величина R считалась постоянной и определялась как $R = \rho \frac{l}{S}$, где ρ , l , S — удельное сопротивление, толщина и площадь базы диодной структуры.

Нелинейное сопротивление R определялось как среднее сопротивление $p-n$ -перехода по первой гармонике СВЧ тока:

$$R = \frac{V^{\sim}}{I^{\sim}}, \quad \text{где } I^{\sim} = \sqrt{A^2 + B^2},$$

$$A = \frac{2}{T} \int_0^T I(V) \sin \omega t \, dt,$$

$$B = \frac{2}{T} \int_0^T I(V) \cos \omega t \, dt,$$

$$V = V_0 + V^{\sim} \sin \omega t.$$

Здесь V_0 и V^{\sim} — величина постоянного напряжения смещения и амплитуда переменного СВЧ напряжения на туннельном диоде, I — ток через активное сопротивление R , $T = 2\pi/\omega$ — период СВЧ колебаний.

В рамках предлагаемой модели постоянное напряжение смещения V_0 отождествляется с мгновенным значением используемого в эксперименте низкочастотного переменного напряжения смещения на туннельном диоде, которое по отношению к СВЧ напряжению можно считать постоянным.

При математическом моделировании протекания тока через туннельный диод использовалось выражение для вольт-амперной характеристики, полученное с учетом изменения туннельной I_T , избыточной I_X и диффузионной I_D компонент полного тока I , вследствие разогрева

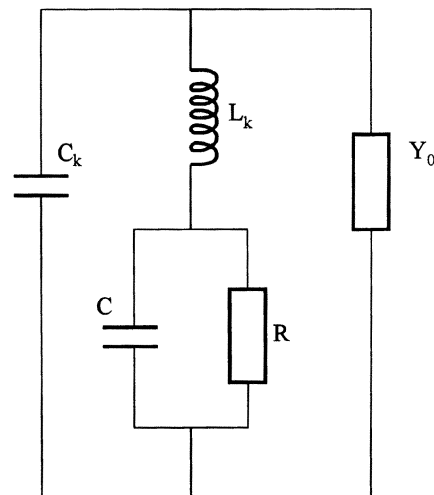


Рис. 3. Эквивалентная СВЧ схема туннельного диода в СВЧ резонаторе.

свободных носителей заряда [5]:

$$I(V) = I_T + I_X + I_D.$$

Здесь

$$I_T = AT_T \int_{\varepsilon_c}^{\varepsilon_v} [f_{CT}(\varepsilon) - f_{VT}(\varepsilon)] g_c(\varepsilon) g_v(\varepsilon) d\varepsilon,$$

$$I_X = A_1 D_x S \exp(-a_x \varepsilon_x).$$

$$I_D = \frac{qSD_n n_{p0}}{L_n} \left\{ \frac{kT_n}{\zeta_n(T_n) - \varepsilon_c} \frac{\zeta_n(T_0) - \varepsilon_c}{kT_0} \right.$$

$$\times \exp\left(\frac{qV_k}{kT_0} - \frac{\zeta_n(T_0) - \varepsilon_c}{kT_0}\right)$$

$$\times \ln \left[1 + \exp\left(\frac{\zeta_n(T_n) - \varepsilon_c}{kT_n} - \frac{qV_k}{kT_n} + \frac{qV}{kT_n}\right) \right] - 1 \left. \right\}$$

$$+ \frac{qSD_p p_{n0}}{L_p} \left\{ \frac{kT_p}{\varepsilon_v - \zeta_p(T_p)} \frac{\varepsilon_v - \zeta_p(T_0)}{kT_0} \right.$$

$$\times \exp\left(\frac{qV_k}{kT_0} - \frac{\varepsilon_v - \zeta_p(T_0)}{kT_0}\right)$$

$$\times \ln \left[1 + \exp\left(\frac{\varepsilon_v - \zeta_p(T_p)}{kT_p} - \frac{qV_k}{kT_p} + \frac{qV}{kT_p}\right) \right] - 1 \left. \right\},$$

где $f_{CT}(\varepsilon)$ и $f_{VT}(\varepsilon)$ — функции распределения Ферми–Дирака электронов в зоне проводимости и в валентной зоне с электронной температурой T_n ; T_p — температура дырок; T_0 — температура решетки; A , A_1 , a_x — константы; T_T — вероятность туннельного перехода через потенциальный барьер между p - и n -областями; $g_c(\varepsilon)$ и $g_v(\varepsilon)$ — плотности энергетических состояний в зоне проводимости и в валентной зоне; ε_c и ε_v — уровни энергии, соответствующие дну зоны проводимости и потолку валентной зоны; ε_g — ширина запрещенной зоны; ζ_n и ζ_p — квазиуровни Ферми в полупроводниках n - и p -типа; D_x — плотность заполненных состояний, расположенных в запрещенной зоне выше потолка валентной зоны на величину ε_x , определяемую выражением

$$\varepsilon_x \approx \varepsilon_g - qV + (\zeta_n(T_n) - \varepsilon_c) + (\varepsilon_v - \zeta_p(T_p));$$

D_n и D_p — коэффициенты диффузии электронов и дырок; S — площадь поперечного сечения p - n -перехода; V — напряжение, приложенное к диоду.

Расчет ВАХ диода проводился с учетом детекторного эффекта с использованием соотношения

$$I_c = \frac{1}{T} \int_0^T I(V) dt.$$

При расчетах учитывалось, что последовательно с туннельным диодом в цепи питания было включено

постоянное сопротивление R_l . Вольт-амперная характеристика $I_c(V_0)$ определялась из решения уравнения

$$V_d = V_0 + I_c R_l,$$

где V_d — напряжение питания, подаваемое на последовательно соединенные туннельный диод и сопротивление.

Амплитуда СВЧ напряжения $V \sim$ определялась по величине поглощенной диодом СВЧ мощности P из соотношения

$$P = \frac{(V \sim)^2}{2R}.$$

Для вычисления величины, поглощенной диодом в резонаторе СВЧ мощности, использовалось выражение [8]

$$P = P_0(1 - |N|^2),$$

где P_0 — падающая на диод СВЧ мощность, $N = \frac{Y - Y_0}{Y + Y_0}$ — коэффициент отражения СВЧ сигнала от диода, $Y = j\omega C_k + \left[\frac{R}{1 + j\omega RC} + j\omega L_k \right]^{-1}$ — комплексная проводимость туннельного диода.

Результаты расчета

Расчеты показали, что в отсутствие СВЧ сигнала при подаче небольшого прямого напряжения V_d большая часть приложенного напряжения падает на последовательно включенном с туннельным диодом 50-омном сопротивлении. С ростом прямого напряжения V_d происходит монотонное увеличение напряжений смещения V_0 на туннельном диоде и V_l на последовательном сопротивлении в пропорции, соответствующей отношению их сопротивлений по постоянному току (рис. 4, кривая I). При достижении напряжением V_0 пикового значения V_p (в нашем случае ≈ 110 мВ) происходит резкое перераспределение напряжений между туннельным диодом и сопротивлением: при увеличении V_d от 1220 до 1240 мВ напряжение V_0 увеличивается от 110 до 420 мВ, т.е. происходит переключение туннельного диода из низкоомного состояния в высокоомное, когда рабочая точка вдоль нагрузочной прямой практически скачком переходит с одной восходящей ветви ВАХ на другую ее восходящую ветвь.

При подаче на туннельный диод СВЧ сигнала наблюдается уменьшение туннельной, резкое увеличение диффузионной и незначительное увеличение избыточной компоненты полного тока туннельного диода [5]. Это приводит к уменьшению тока в максимуме I_p прямой ветви ВАХ туннельного диода при некотором увеличении напряжения смещения V_p , соответствующем этому максимуму тока. Следовательно, воздействие СВЧ сигнала на туннельный диод приводит к увеличению его сопротивления по постоянному току в области преобладания туннельной компоненты полного тока и уменьшению в области преобладания диффузионной компоненты полного тока.

Такое изменение ВАХ туннельного диода приводит к тому, что в области положительного наклона ВАХ вблизи нулевого смещения величина напряжения, падающего на туннельном диоде V_0 при фиксированном значении V_d , с ростом мощности СВЧ сигнала увеличивается. При увеличении мощности внешнего СВЧ сигнала, до некоторого значения P_p , величина V_0 достигает значения, соответствующего началу падающего участка на ВАХ туннельного диода, и происходит резкое перераспределение постоянных напряжений между туннельным диодом и последовательным сопротивлением (рис. 5, кривые 3, 4), при котором рабочая точка переходит вдоль нагрузочной прямой через область ОДС в точку, расположенную на восходящей ветви ВАХ туннельного диода. Этот эффект и наблюдался в описанном выше эксперименте.

Дальнейшее увеличение мощности СВЧ сигнала, как было отмечено выше, приводит к уменьшению сопротивления туннельного диода в области преобладания диффузионной компоненты полного тока, т.е. на второй восходящей ветви ВАХ туннельного диода. Это приводит к некоторому уменьшению напряжения смещения V_0 на туннельном диоде при фиксированном значении V_d .

На рис. 6 представлены вольт-амперные характеристики туннельного диода, рассчитанные при различных уровнях мощности воздействующего СВЧ сигнала и одном и том же интервале напряжений V_d .

Отметим, что изменение ВАХ туннельного диода под действием СВЧ сигнала с ростом мощности приводит

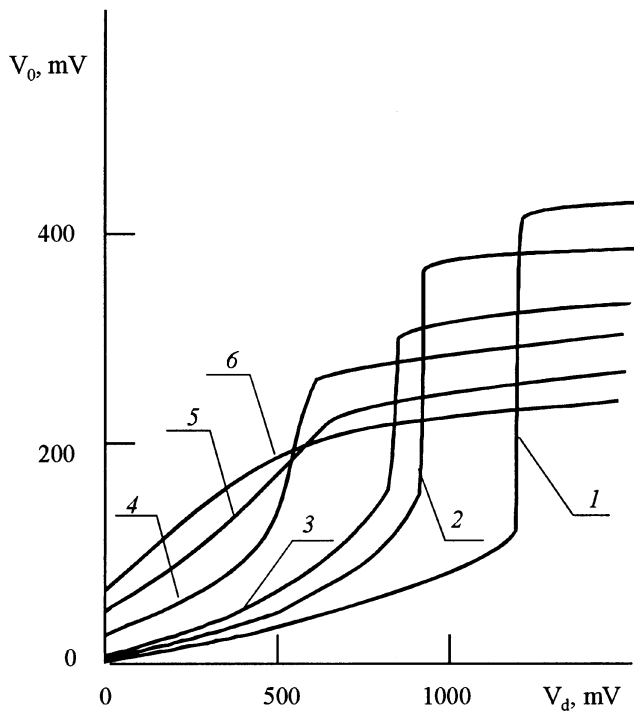


Рис. 4. Расчетные зависимости величины напряжения смещения на туннельном диоде V_0 от напряжения питания V_d при различных уровнях мощности СВЧ сигнала. P_0 , мВт: 1 — 0, 2 — 50, 3 — 100, 4 — 400, 5 — 800, 6 — 1200.

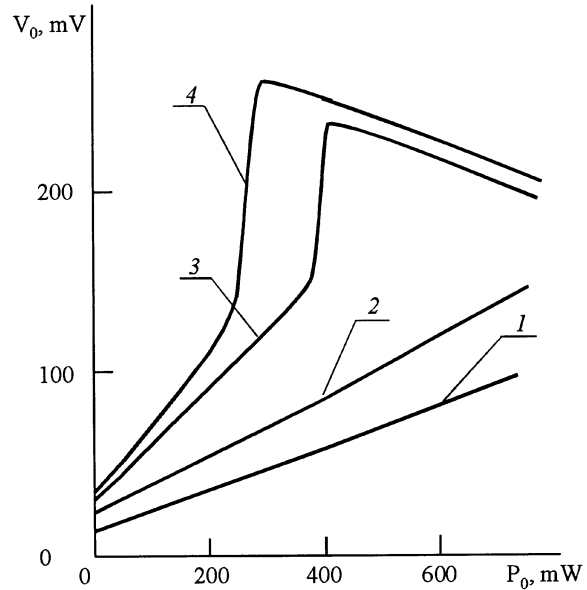


Рис. 5. Зависимости величины напряжения смещения на туннельном диоде V_0 от уровня мощности СВЧ сигнала P_0 при различных значениях напряжения питания. V_d , мВ: 1 — 250, 2 — 350, 3 — 500, 4 — 550.

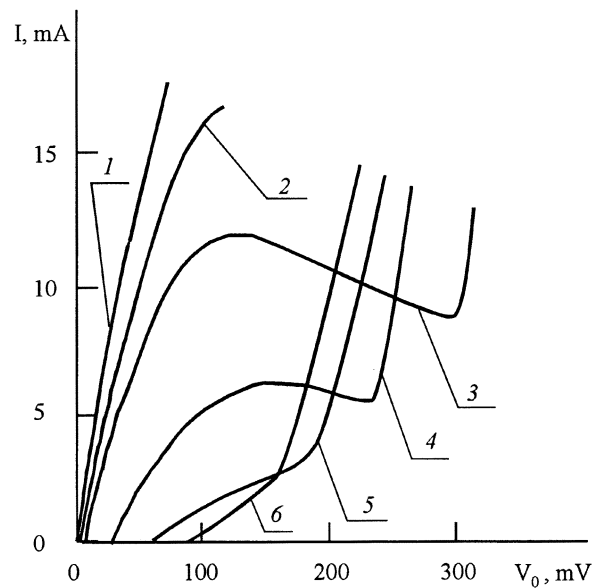


Рис. 6. ВАХ туннельного диода, рассчитанные при различных уровнях мощности воздействующего СВЧ сигнала. P_0 , мВт: 1 — 0, 2 — 50, 3 — 100, 4 — 400, 5 — 800, 6 — 1200.

к смещению участка резкого возрастания V_0 на зависимости $V_0(V_d)$ в сторону меньших значений V_d (рис. 4, кривые 2–4).

Поскольку, как следует из результатов расчета, представленных на рис. 5, значение P_p , при котором V_0 достигает значения, соответствующего началу падающего участка на ВАХ, определяется величиной напряжения V_d и увеличивается с уменьшением последней, то при

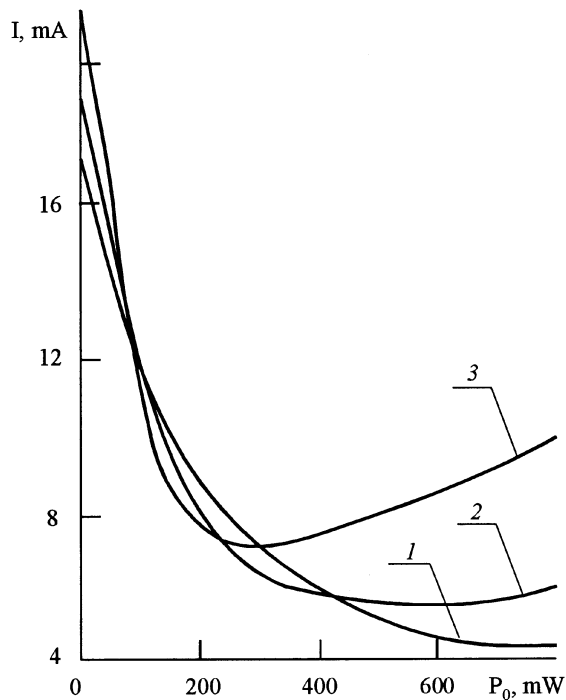


Рис. 7. Зависимости постоянного тока туннельного диода от уровня мощности СВЧ сигнала. V_d , мВ: 1 — 250, 2 — 270, 3 — 300.

малых значениях V_d эффект резкого перераспределения напряжений должен происходить при больших уровнях СВЧ мощности. Значительное же увеличение мощности СВЧ сигнала приводит к такому уменьшению тока в максимуме и уменьшению его в минимуме ВАХ туннельного диода, что происходит исчезновение N -образности ВАХ, и она становится подобной прямой ветви обращенного диода. При еще большей величине СВЧ сигнала ВАХ диода становится близкой к линейной.

Такое изменение вольт-амперной характеристики приводит к исчезновению эффекта резкого переключения туннельного диода из низкоомного в высокоомное состояние и области ОДС. На зависимостях $V_0(P)$ (рис. 5, кривые 1, 2) и $V_0(V_d)$ (рис. 4, кривые 5, 6) в этом случае скачкообразного изменения V_0 исчезают.

Следовательно, при заданном типе туннельного диода и выбранном значении последовательного сопротивления существует минимальное значение напряжения V_{dm} и соответствующее ему значение напряжения смещения V_{0m} , при котором возможен эффект возникновения режима ОДС и переключения под действием внешнего СВЧ сигнала. Величина тока I_{0m} в отсутствие СВЧ сигнала при $V_0 = V_{0m}$ для диода типа 1И308 при $R_l = 50$ Ом составляет $0.5I_p$.

Отметим, что, выбирая напряжение смещения на участке положительного наклона ВАХ $V_{0m} < V_0 < V_p$, при включении последовательно с диодом сопротивления $R_l = 50$ Ом, значительно превосходящего сопротивление туннельного диода R_0 вблизи нулевого смещения, с помощью внешнего СВЧ сигнала можно осуществлять

переключение туннельного диода через область ОДС по напряжению (рис. 4, кривые 2, 3, 4), а при включении сопротивления $R_l = 10$ Ом, сравнимого с R_0 , с помощью СВЧ сигнала можно осуществлять переключение туннельного диода через область ОДС по току (рис. 7).

Результаты проведенных расчетов находятся в хорошем качественном и количественном согласии с полученными экспериментальными данными.

Заключение

Таким образом, экспериментально показано и теоретически обоснована возможность возникновения режима отрицательного дифференциального сопротивления и переключения в туннельном диоде под действием внешнего СВЧ сигнала при напряжениях питания на диоде, не достигающих пикового значения.

Список литературы

- [1] А.И. Вейнгер, А.Г. Парицкий, Э.А. Акопян, Г. Дадамирзаев. ФТП, **2**, 216 (1975).
- [2] Н.А. Абляимова, А.И. Вейнгер, В.С. Питанов. ФТП, **11**, 2001 (1988).
- [3] Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Н.В. Угрюмова. ФТП, **11**, 1399 (1998).
- [4] Д.А. Усанов, Б.Н. Коротин, В.Е. Орлов, А.В. Скрипаль. Письма ЖТФ, **16**(8), 50 (1990).
- [5] Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Б.Н. Коротин, В.Е. Орлов. Письма ЖТФ, **19**(7), 81 (1993).
- [6] Д.А. Усанов, Б.Н. Коротин, В.Е. Орлов, А.В. Скрипаль. Изв. вузов. Радиофизика, **34**(1), 98 (1991).
- [7] Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, В.Е. Орлов, Б.Н. Коротин. Изв. вузов. Электроника, № 1–2, 129 (1996).
- [8] Дж. Хелзайн. *Пассивные и активные цепи СВЧ* (М., Радио и связь, 1981).

Редактор В.В. Чалдышев

Generation of the regime of a negative differential resistance and switch in the tunnel diode under the action of an outer microwave frequency signal

D.A. Usanov, A.V. Skripal', N.V. Ugryumova, S.B. Venig, V.E. Orlov

Saratov State University,
410026 Saratov, Russia