

АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛЬТ - АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА

© 2012 М. Н. Пиганов, В. Д. Дмитриев, С. В. Тюлевин, А. В. Кочкина

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Проведён анализ работы туннельного диода, рассмотрена эквивалентная схема, проведено моделирование прямой ветви вольт-амперной характеристики, приведены расчетные зависимости функций, составляющих вольт-амперную характеристику.

Туннельный диод, вольт-амперная характеристика, анализ, моделирование.

Введение

Туннельный диод – это полупроводниковый диод, изготовленный на основе вырожденного полупроводника, т.е. полупроводника с высокой концентрацией примесей, в котором туннельный эффект приводит к появлению на вольт-амперной характеристике участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением [1]. Он был открыт в 1958г. японским физиком, профессором Токийского университета Лео Эсаки [2]. На падающем участке вольт-амперной характеристики (ВАХ) туннельный диод представляет собой активный двухполосник, что позволяет реализовать на его основе широкий круг радиоэлектронных устройств: усилители, генераторы, преобразователи частоты, детекторы, смесители, запоминающие устройства и др. Туннельный диод способен работать на достаточно больших частотах ($10^{10} \dots 10^{11}$ Гц), при высоких температурах (до 400 °С), и больших уровнях радиации (до 10^{17} нейтронов /см³); обладает низким уровнем собственных шумов.

Толщина электрического перехода туннельных диодов составляет 1...10 нм. Туннельные переходы совершаются носителями заряда без затраты энергии. Высокая концентрация примесей в *p* и *n*-областях туннельного диода приводит к тому, что локальные уровни примесей образуют в вырожденных полупроводниках сплошную зону. Уровни Ферми полупроводников $E_{фр}$ и

$E_{фп}$ будут расположены соответственно в валентной зоне *p*-области и зоне проводимости *n*-области. В состоянии термодинамического равновесия измеренный ток через переход равен 0. При небольших прямых напряжениях заполненные электронами энергетические уровни зоны проводимости *n*-области частично расположатся напротив свободных уровней валентной зоны *p*-областей. Поэтому, в основном, будут наблюдаться туннельные переходы электронов из *n* в *p*-область, появится прямой ток диода. Вольт - амперная характеристика туннельного диода при смещениях будет образована суммированием туннельного тока и тока ВАХ *p-n*-перехода (тока инжекции) [3].

Эквивалентная схема туннельного диода

Эквивалентная схема диода приведена на рис. 1 [2]. Верхняя часть схемы содержит элементы собственно диода, а нижняя – элементы внешней цепи.

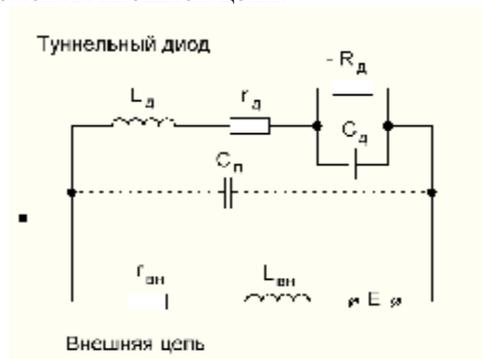


Рис. 1. Эквивалентная схема туннельного диода

На схеме приняты следующие обозначения:

$-R_d = \frac{du}{di}$ – дифференциальное отрицательное сопротивление туннельного диода, пропорциональное наклону падающего участка вольт-амперной характеристики в точке, определяемой смещением. Модуль дифференциального сопротивления $|-R_d|$ практически не зависит от частоты до 10^{13} Гц, и он тем меньше, чем больше примесей содержится в n и p -областях диода. Диод, работающий в диапазоне СВЧ, должен иметь малое значение $|-R_d|$. В то же время величина $|-R_d|$ не должна быть существенно меньше волновых сопротивлений волноводных и коаксиальных трактов, в которых работает диод, так как необходимо согласовать эти сопротивления в довольно широком диапазоне частот. Кроме того, малые значения $|-R_d|$ создают трудности для получения устойчивой рабочей точки в схеме подачи смещения и при подавлении паразитных колебаний в резонансной системе усилителя. Зависимость модуля дифференциального сопротивления диода от величины приложенного напряжения носит существенно нелинейный характер. Характер нелинейности влияет на динамический диапазон усилителя и на вид колебаний в генераторе.

C_d – ёмкость диода, определяемая ёмкостью p - n -перехода. Она изменяется в пределах падающего участка вольт-амперной характеристики примерно на 20%.

r_d – суммарное сопротивление потерь в материале полупроводника, в контактах и выводах. Сопротивление r_d имеет примерно одно и то же значение в пределах всего рабочего участка вольт-амперной характеристики.

L_d – суммарная индуктивность диода, в которую входят индуктивность патрона и выводов; зависит в основном от геометрической формы выводов.

C_{Π} – паразитная емкость патрона и выводов прибора. У современных туннельных диодов эта емкость мала и в большинстве случаев ее можно не учитывать функцией вида

вать, поэтому на эквивалентной схеме она показана пунктиром.

$r_{вн}$, $L_{вн}$ – элементы, учитывающие параметры внешних проводов, нагрузки и параметры источника питания.

Числовые значения параметров R_d , C_d , r_d и L_d зависят от материала, из которого изготовлен туннельный диод, его конструктивного оформления, концентрации примесей и лежат в пределах: $|-R_d| = 5 \dots 500$ Ом; $C_d = 1 \dots 200$ пф (у лучших диодов $C_d = 0,2 \dots 2$ пф); $L_d = 10^{-8} \dots 10^{-10}$ Гн; $r_d = 1 \dots 15$ Ом.

Моделирование ВАХ

Прямая ветвь вольт-амперной характеристики (ВАХ) туннельного диода характеризуется параметрами y_{max} при значениях x_1 , y_{min} при x_2 , падающим и возрастающим участками в интервалах $x_1 \dots x_2$ и $x_2 \dots x_3$ соответственно (рис. 2).

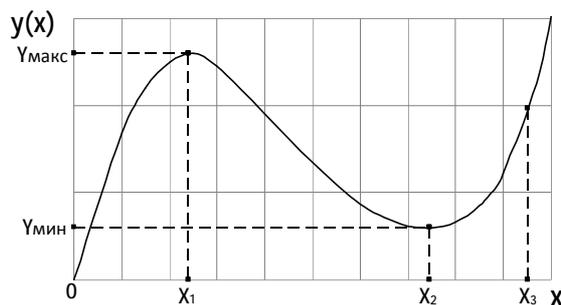


Рис. 2. ВАХ туннельного диода

Для моделирования вольт-амперную характеристику диода рассмотрим в виде двух основных участков: участка туннельного тока (интервал $0 \dots x_2$) и участка тока инжекции (интервал $x_2 \dots x_3$) и обозначим их функциями $y_1(x)$ и $y_2(x)$ соответственно. Следовательно, полную зависимость ВАХ представим в виде суммы двух функций $y(x) = y_1(x) + y_2(x)$. В качестве $y_1(x)$ используем известную функцию [1]

$$y_1(x) = a \cdot x^b e^{-cx}, \quad (1)$$

в которой a , b и c – положительные коэффициенты, причем a и c определяют уровень экстремума и крутизну падающего участка характеристики. Для формирования второй части ВАХ воспользуемся экспонен-

$$y_2(x) = d \cdot (e^{kx} - 1), \quad (2)$$

где коэффициенты d и k положительны и определяют уровень и крутизну функции соответственно. При этом общую функцию $y(x)$ ВАХ туннельного диода представим в виде

$$y(x) = a \cdot x^b e^{-cx} + d \cdot (e^{kx} - 1). \quad (3)$$

Коэффициенты a, b, c, d и k заданной функции взаимосвязаны со значениями $y_{max}, y_{min}, x_1, x_2$, исходящими из условия $\frac{\partial y(x)}{\partial x} = 0$, т.е.

$$x^b \left(\frac{1}{x} - \frac{c}{b} \right) + \frac{kd}{ab} e^{(k+c) \cdot x} = 0. \quad (4)$$

Определение коэффициентов a, b, c, d и k из выражений (3) и (4) связано с решением систем сложных алгебраических уравнений. Однако задачу можно упростить, допуская, что влияние функции $y_2(x)$ на значения x_1 и y_{max} мало.

При этом параметр x_1 определяется из условия $\frac{\partial y_1(x)}{\partial x} = 0$, из которого следует $x_1 = b/c$. (5)

Следовательно, исходя из выражений (1) и (5), запишем зависимость для значения экстремума (y_{max})
$$y_{max} = a \cdot x_1^b e^{-cx_1}, \quad (6)$$
 где x_1 и y_{max} – справочные или экспериментальные данные туннельного диода.

Для определения коэффициентов k и d на основе выражений (3)...(5) составим

$$\begin{cases} x_2^b \left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} \right) = \frac{kd}{ab} e^{(k+c) \cdot x_2}; \\ y_{min} = a \cdot x_2^b \cdot e^{-cx_2} + d \cdot (e^{kx_2} - 1). \end{cases} \quad (7)$$

систему уравнений

Решая данную систему уравнений относительно коэффициентов k и d , получаем

$$\frac{1}{k} (1 - e^{-kx_2}) = \frac{(y_{min} \cdot e^{cx_2} \cdot x_2^{-b} - a) \cdot x_1 \cdot x_2}{ab(x_2 - x_1)}; \quad (8)$$

$$d = \frac{ab \cdot (x_2 - x_1) \cdot x_2^b}{k \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot e^{(k+c)x_2}}. \quad (9)$$

При условии $e^{-kx_2} \ll 1$ (реально $kx_2 > 5$) выражение (8) упрощается:

$$\frac{1}{k} = (y_{min} \cdot e^{cx_2} \cdot x_2^{-b} - a), \quad (10)$$

где x_1, x_2 и y_{min} – справочные или экспериментальные данные туннельного диода.

Для подтверждения достоверности данной разработки приведены расчеты функции $y(x)$ для различных значений коэффициентов. Один из вариантов расчета ВАХ при параметрах $a = 364; b = 1,97; c = 7,0$ и $d = 1,34 \cdot 10^{-4}$ для различных значений k приведен на рис. 3.

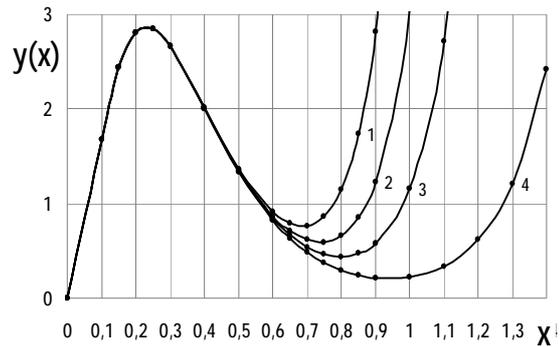


Рис. 3. Вольтамперные характеристики туннельного диода: 1- $k=11$; 2- $k=10$; 3- $k=9$; 4- $k=7$

Из полученных ВАХ видно, что увеличение значения коэффициента k при $c = const$ приводит к уменьшению величины x_2 и увеличению y_{min} . С увеличением величины параметра c характер изменения значений x_2 и y_{min} сохраняется (рис. 4).

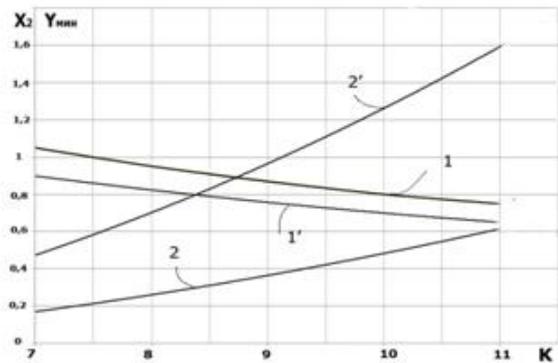


Рис. 4. Зависимость параметров y_{min} и x_2 от коэффициента kx_2 : 1 – $C=7$; 1' – $C=9$; y_{min} : 2 – $C=7$; 2' – $C=9$

Графики зависимостей $x_1 = f(c), x_2 = f(c), y_{min} = f(c)$ и $y_{max} = f(c)$ при фиксированном значении коэффициента k ($k = 7$) приведены на рис. 5, 6 и 7.

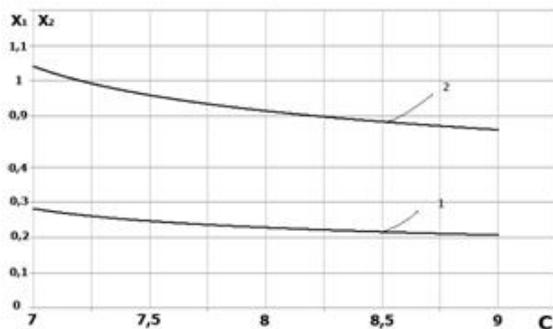


Рис. 5. Зависимость параметров x_1 и x_2 от значений C при $k=7$ – x_1 ; 2 – x_2 .

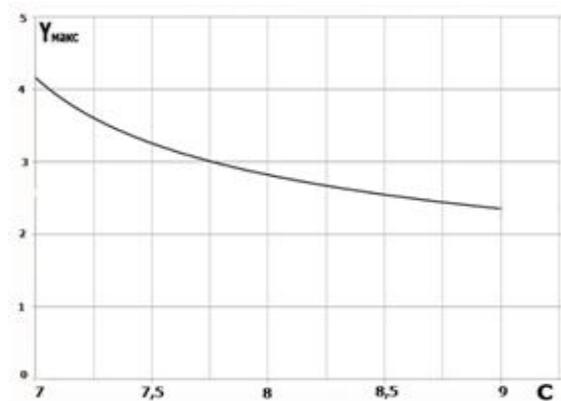


Рис. 6. Зависимость параметра y_{max} от значений C при $K=7$

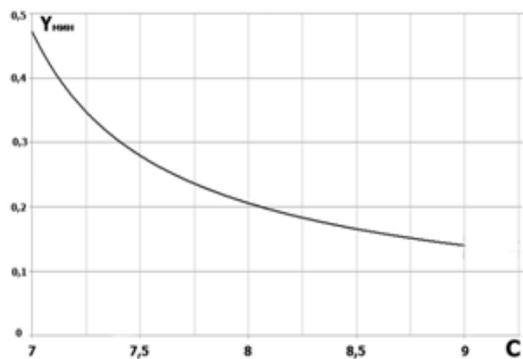


Рис. 7. Зависимость параметра y_{min} от значений C при $k=7$

Данные графиков показывают, что коэффициент c влияет на значения параметров U_{max} , U_{min} , x_1 и x_2 , причем с увеличением его значения ВАХ диода сдвигается в область малых значений x .

Следует отметить, что для формирования желаемой ВАХ необходимо исходить из справочных или экспериментальных данных U_{max} , U_{min} , x_1 и x_2 туннельного диода и на их основе определить соответствующие коэффициенты функции $y(x)$.

Библиографический список

1. Ямпурин, Н.П. Электроника: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений [Текст] / Н.П. Ямпурин, А.В. Баранова, В.И. Обухов. – М.: Издательский центр «Академия», 2011. – 240 с.
2. Янчук, Е.В. Туннельные диоды в усилительных устройствах [Текст] / Е.В. Янчук. – М.: Энергия, 1967. – 56 с.
3. Дулин, В.Н. Электронные приборы: учебник для вузов [Текст] / В.Н. Дулин [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 496 с.

ANALYSIS AND MODELING OF CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF THE TUNNEL DIODE

© 2012 M. N. Piganov, V. D. Dmitriev, S. V. Tyulevin, A.V. Tokareva

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

The analysis of the tunnel diode are carried out, the equivalent circuit is considered, a direct branch of the current-voltage characteristics is simulated, the calculated dependences of the functions are submitted that make up the current - voltage characteristic.

The tunnel diode, the current-voltage characteristics, analysis, modeling.

Информация об авторах

Пиганов Михаил Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: piganov@ssau.ru. Область научных интересов: надёжность и качество радиоэлектронных средств.

Дмитриев Василий Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kipres@ssau.ru. Область научных интересов: технология микросборок.

Тюлевин Сергей Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kipres@ssau.ru. Область научных интересов: надёжность и качество космических радиоэлектронных средств.

Кочкина Алёна Викторовна, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kipres@ssau.ru. Область научных интересов: надёжность и качество радиоэлектронных средств.

Piganov Mikhail Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, head of design and production radio-electronic means, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: piganov@ssau.ru. Area of scientific: quality and reliability of radio-electronic equipment.

Dmitriev Vasily Dmitrievich, candidate of technical sciences, assistant professor of design and production radio-electronic means, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: kipres@ssau.ru. Area of scientific: technology of microassemblages.

Tyulevin Sergei Viktorovich, candidate of technical sciences, assistant professor of design and production radio-electronic means, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: kipres@ssau.ru. Area of scientific: quality and reliability of space-based radioelectronic means.

Kochkina Alena Viktorovna, post-graduate student design and manufacture of electronic resources, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: kipres@ssau.ru. Area of scientific: quality and reliability radio electronic means.