

Кыров Леонид Алексеевич,
студент гр.ЭН-19-1, Ангарский государственный технический университет
Мингалимов Кирилл Евгеньевич,
студент гр.ЭН-19-1, Ангарский государственный технический университет
Пудалов Алексей Дмитриевич
к.т.н, доцент, Ангарский государственный технический университет
e-mail: puddim@rambler.ru

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

Kyrov L. A., Mingalimov K. E. Poudalov A. D.

CALCULATION OF THE PARAMETERS OF A NONLINEAR MODEL OF A SEMICONDUCTOR DIODE

Аннотация. Предложено два способа вычисления параметров нелинейной модели полупроводникового диода. Показано различие этих способов. Первый способ предполагает использование справочных данных, что затрудняет его применение. Сделан акцент на численный метод определения параметров нелинейной модели диода с помощью математических программных пакетов. Второй способ предполагает проведение экспериментальных исследований на реальном полупроводниковом диоде.

Ключевые слова: полупроводниковый диод, вольтамперная характеристика, электроника, эксперимент, математическая модель, параметры модели.

Abstract. Two methods for calculating the parameters of a nonlinear model of a semiconductor diode are proposed. The difference between these methods is shown. The first method involves the use of reference data, which makes it difficult to use. Emphasis is placed on a numerical method for determining the parameters of a nonlinear diode model using mathematical software packages. The second method involves conducting experimental studies on a real semiconductor diode.

Keywords: semiconductor diode, current-voltage characteristic, electronics, experiment, mathematical model, model parameters.

Наиболее распространенной моделью выпрямительного диода является модифицированная модель Эберса-Молла (рисунок 1 а). Вольтамперная характеристика (ВАХ) такого диода представлена на рисунке 1 б.

Прямая ветвь ВАХ ($U_D > 0$) описывается выражением:

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(\frac{U_D - r_\delta I_D}{m \cdot \phi_T} \right) - 1 \right], \quad (1)$$

где I_0 – масштабный ток диода, который также называется тепловым током в силу большой зависимости от температуры; m – коэффициент неидеальности; r_δ – омическое сопротивление базы диода.

Наиболее часто ВАХ диода представляют следующим выражением:

$$U_D = I_D r_\delta + m \cdot \phi_T \ln \left(1 + \frac{I_D}{I_0} \right) \quad (2)$$

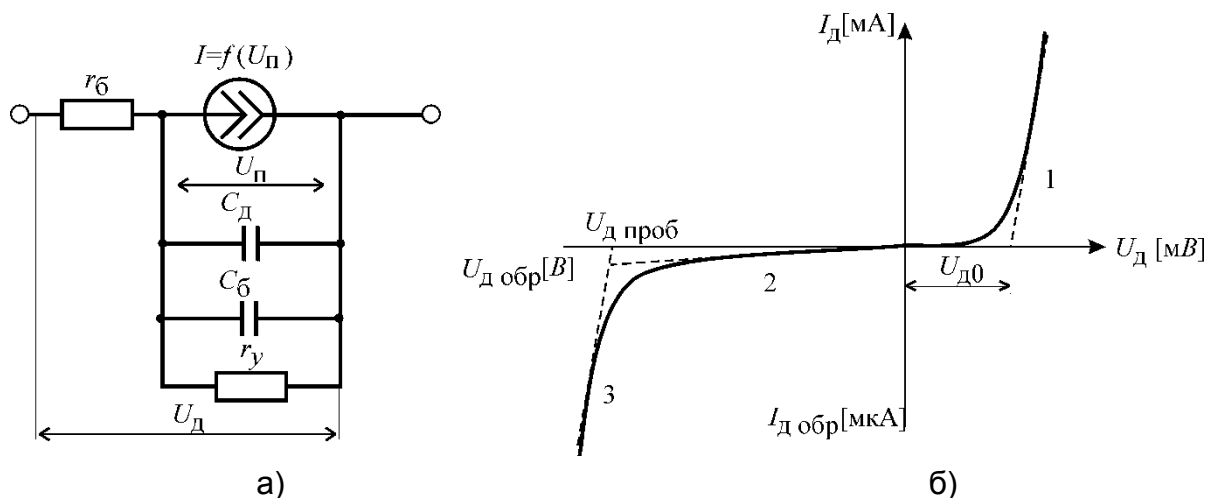


Рисунок 1 – Нелинейная модель выпрямительного диода (а), ВАХ диода (б)

Однако для лучшей обусловленности модели целесообразнее рассматривать ВАХ не как $I = f(U)$ (1), а как $U = f(I)$ (2) [1,2]. Это связано с тем, что в области малых токов поправкой $I_0 r_б$ – можно пренебречь, однако с увеличением тока напряжение $U_б = I_0 r_б$ – растет линейно, а напряжение на переходе $U_п = m \cdot \phi_T \cdot \ln\left(1 + \frac{I_д}{I_0}\right)$ – логарифмически, т. е. слабее. Поэтому при достаточно больших токах всегда преобладает напряжение базы и экспоненциальная характеристика диода вырождается.

Первое слагаемое уравнения (2) учитывает падение напряжения на сопротивлении базы, в общем случае [3]:

$$r_б = \rho_б \frac{\omega}{S}, \quad (3)$$

где ω – толщина базы; S – площадь поперечного сечения; $\rho_б$ – удельное сопротивление материала базы.

В реальных условиях параметры выражения (3) неизвестны разработчику модели, поэтому для нахождения сопротивления базы можно воспользоваться следующим методом. Дифференциальное сопротивление диода определяется дифференцированием выражения (2) по току:

$$r_б = \frac{dU_д}{dI_д} = r_б + \frac{\phi_T}{I_0 + I_д}, \quad (4)$$

и делается предположение, что при $I_д \rightarrow \infty$ напряжение на переходе определяется только падением только на $r_б$. Строится зависимость $r_б$ от $1/I_д$ и определяется значение $r_б$ как отрезок, отсекаемый на оси $r_б$ (рисунок 2).

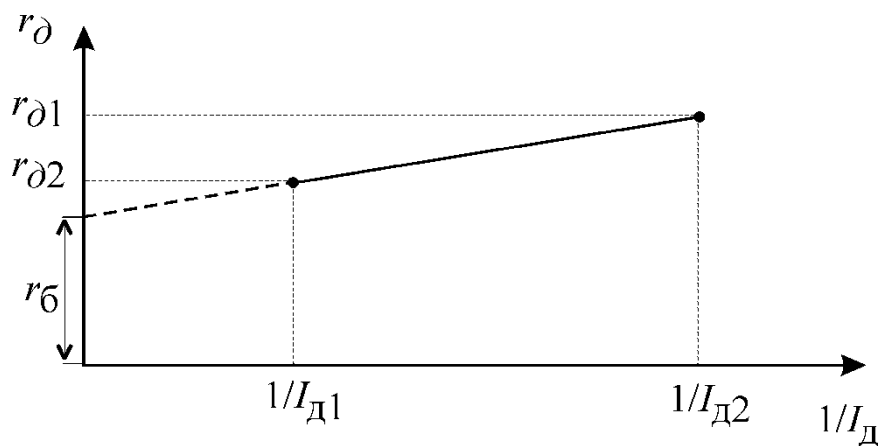


Рисунок 2 – Зависимость r_0 от $1/I_D$

Следует также заметить, что учет r_0 в модели имеет смысл только в том случае, когда $U_D \gg \phi_T$ т.к. в противном случае ток диода определяется в основном сопротивлением перехода.

Для определения теплового тока I_0 можно воспользоваться выражением (1) (без учета коэффициента неидеальности m), выразив из него искомую величину:

$$I_0 = \frac{I_D}{\exp\left(\frac{U_D - I_D r_0}{\phi_T}\right)}, \quad (5)$$

и по одной из точек ВАХ вычислить искомое значение.

Для учета влияния температуры на величину теплового тока I_0 используем выражение:

$$I_0(T) \approx I_0(T_0) \exp(\alpha \Delta T), \quad (3.6)$$

где $I_0(T_0)$ – значение теплового тока диода при заданной температуре (справочная величина); $\alpha = 0,13 \phi_3$, где ϕ_3 – ширина запрещенной зоны, для кремния $\alpha_{Si} = 0,13^\circ\text{C}^{-1}$, для германия $\alpha_{Ge} = 0,09^\circ\text{C}^{-1}$.

Сопротивление утечки r_y находится по наклону обратной ветви (рисунок 1, б, участок 2).

Для моделирования работы диода при обратном смещении можно использовать схему, представленную на рисунке 3.

Ток через диод при обратном смещении определяется соотношением:

$$I_{D \text{ обр}} = I_{\text{обр}} - \frac{U_{D \text{ обр}}}{r_{\text{обр}}}. \quad (7)$$

Сопротивление $r_{\text{обр}}$ определяется по наклону аппроксимирующей прямой (рисунок 3)

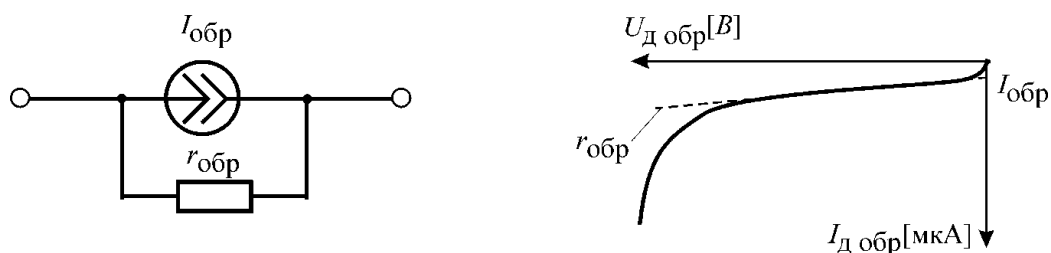


Рисунок 3 – Моделирование обратной ветви ВАХ диода

Инерционность диода учитывается с помощью двух емкостей (рисунок 1 а) диффузионной (C_d) и барьерной емкостью (C_b).

Диффузионная емкость отображает перераспределение зарядов неосновных носителей в области р-п перехода при изменении приложенного напряжения:

$$C_d = \tau_d I_0 \exp\left(\frac{U_p}{\phi_T}\right) / \phi_T. \quad (8)$$

Постоянная времени диода τ_d определяется по времени восстановления t_p при переключении диода с прямого тока $I_{пр}$ на обратный $I_{обр}$:

$$\tau_d = t_p / \ln\left(1 + \frac{I_{пр}}{I_{обр}}\right). \quad (9)$$

Если в справочнике вместо τ_d указывается заряд восстановления Q_s , то:

$$\tau_d = Q_s / I_{пр}. \quad (10)$$

Барьерная емкость обусловлена наличием обедненного слоя, на границах которого сконцентрированы ионизированные атомы разной полярности. Её величина зависит от концентрации примесей и геометрических размеров самого р-п перехода, а также от приложенного к переходу напряжения:

$$C_b = \frac{C_{b0}}{(1 - U_p/F)^K}, \quad (11)$$

где C_{b0} – барьерная емкость при нулевом смещении перехода. Параметры аппроксимации F и K определяются по зависимости барьерной емкости от напряжения, и в простом случае можно считать $F = 1$, $K = 0,33 \dots 0,5$.

Вычисления параметров нелинейной модели полупроводникового диода по формулам 3-11 связано с выполнением значительных расчетов и необходимостью обладать большим объемом справочных данных. В том случае, когда справочная информация недоступна, а в распоряжении есть реальный полупроводниковый диод, то вычисление параметров модели может быть осуществлено на основе экспериментальных данных.

Для проведения экспериментов необходим блок питания постоянного тока.

Получив ряд значений токов и напряжений, составляется система уравнений для определения неизвестных параметров модели. При этом используют различные методы. Наиболее популярными являются метод выбранных точек и метод наименьших квадратов из-за своей простоты в расчетах с помощью ЭВМ.

Метод выбранных точек заключается в выборе из экспериментальных данных наиболее характерных точек с последующей их подстановкой в математическую модель. Метод удобен тем, что количество выборок позволяет составить систему уравнений по количеству превышающих число неизвестных параметров модели.

Метод наименьших квадратов удобен своей универсальностью, за что и получил свое широкое применение. Суть метода заключается в том, что неизвестные параметры модели оцениваются по принципу минимального отклонения экспериментальных данных $Y_{\text{эксп}}$ от их теоретического описания $Y_{\text{теор}}$, т.е.:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{\text{эксп}}(x_i) - Y_{\text{теор}}(x_i)) \rightarrow \min.$$

Для того, чтобы при увеличении n данная сумма не была равна нулю – ее возводят в квадрат:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{\text{эксп}}(x_i) - Y_{\text{теор}}(x_i))^2 \rightarrow \min. \quad (12)$$

Из математики известно, что функция имеет минимум в точке, где производная этой функции равна нулю, таким образом находя частные производные по неизвестным параметрам модели можно определить такие величины этих параметров, при которых функция (12) действительно минимальна.

Определение параметров нелинейной модели полупроводникового диода вторым способом позволяет обеспечить высокую точность (погрешность около 0,1 %), а также высокую скорость расчетов, применяя математические программные пакеты, например, MathCAD.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пудалов, А. Д.** Методические указания по выполнению комплексной лабораторной работы по курсу «Математическое моделирование устройств промышленной электроники». Ангарск : АГТА 2011. – 52 с. – Текст : непосредственный.

2. **Мазур, В. Г., Пудалов, А.Д.** Методические указания по выполнению курсового проектирования по дисциплине «Математическое моделирование электронных устройств». Многовариантный анализ транзисторного усилителя». Ангарск : АГТА 2013. – 38 с. – Текст : непосредственный.

3. **Хоровиц, П.** Искусство схемотехники / Хоровиц П., Хилл У. – Москва : Издательство БИНОМ 2014. - 704 с., ил. – Текст : непосредственный.