

МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Лабораторная работа
**«Изучение характеристик и моделей
полупроводниковых диодов»**

Москва, 2006 г.

В основе идеализированной модели диода для большого сигнала лежит модель p - n перехода, представленная эквивалентной схемой (см. рисунок 1.)

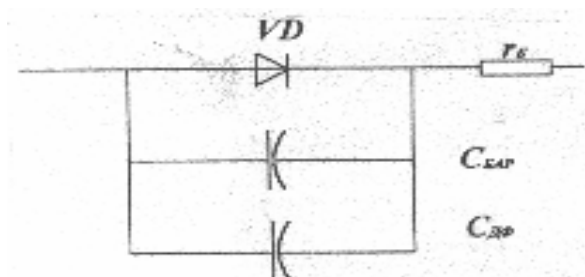


Рисунок 1.

На схеме диод VD моделируется ВАХ, описываемой формулой $I=I_0[\exp(u/\varphi_T) - 1]$, где I_0 – тепловой ток; u –напряжение на переходе; $\varphi_T = kT/q$ – тепловой потенциал; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; q – заряд электрона; $\varphi_T = 0,026$ В при $T = 300$ К.

В идеализированной модели диода сопротивление r_B моделирует сопротивление области диода с низкой концентрацией примесей (базы), а также может учитывать сопротивление омических контактов между металлическими выводами диода и полупроводниковыми областями. Конденсатор $C_{бар}$ моделирует барьерную емкость, а $C_{дф}$ – диффузионную емкость p - n перехода.

Диод VD и сопротивление базы r_B являются статическими параметрами, а барьерная $C_{бар}$ и диффузная $C_{дф}$ емкости – динамическими параметрами диода.

Идеализированная модель диода с p - n переходом может приводить к значительным ошибкам расчета ВАХ при больших прямых токах, так как не учитывает эффект модуляции сопротивления базы, который заключается в снижении r_B с ростом величины прямого тока из-за увеличения числа носителей заряда в базе за счет инжекции их из эмиттера.

В модифицированной модели диода для учета данного эффекта ВАХ диода VD задается формулой

$$I = I_0^l [\exp(u/m \cdot \varphi_T) - 1],$$

где m – коэффициент, обычно имеющий диапазон значений в пределах $1 \dots 3$ и в общем случае зависящий от диапазона изменения тока, в котором должно производиться моделирование. Параметр I_0^l не совпадает с тепловым током I_0 . Сопротивление r_B (в схеме $r_B = r_{B0}$) является формальным параметром модели диода и не совпадает с сопротивлением базы (в частности возможно $r_{B0} = 0$). Все три параметра I_0^l , m , r_{B0} определяются из условия наилучшего совпадения расчетной ВАХ с экспериментальной.

Динамические параметры зависят от напряжения u на диоде VD.

Диффузионная емкость существенна при прямом напряжении и может быть выражена через ток диода

$$C_{\text{эф}} = I \frac{\tau_{\text{эф}}}{\varphi_T},$$

где $\tau_{\text{эф}}$ – эффективное время жизни неосновных носителей заряда в базе диода. Оно определяется экспериментально на специальной установке (рисунок 2).

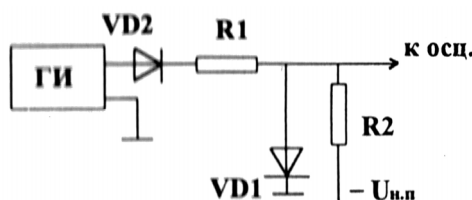


Рисунок 2.

От генератора импульсов (ГИ) на исследуемый диод $VD1$ через токоограничительное сопротивление $R1$ и вспомогательный быстродействующий диод $VD2$ (с пренебрежимо малым по сравнению с $VD1$ временем восстановления обратного сопротивления) поступают положительные импульсы напряжения с амплитудой $U_{\text{зи}}$. Изменение напряжения на диоде $VD1$ во времени $U_{VD1}(t)$ наблюдаются на осциллографе (рисунок 4).

В момент времени t_1 подается импульс напряжения и через некоторое время устанавливаются на диоде ток и напряжение, определяемые ста-

тическим режимом. В момент времени t_2 напряжение на генераторе падает до нуля и начинается переходной процесс снижения напряжения на диоде $VD1$. Диод $VD2$ практически мгновенно запирается, отключая генератор импульсов от диода $VD1$. Ток через диод $VD1$ скачком уменьшается на величину $I_{np} = U_{cu}/R_1$, а напряжение на диоде U_{VD1} скачком уменьшается на величину $\Delta U = r_B \cdot U_{cu}/R_1$. Следовательно, сопротивление базы может быть определено не только из статических характеристик, но и из импульсных измерений при известных U_{cu} и R_1 . При $t_2 < t < t_3$ напряжение на диоде остается прямым и медленно уменьшается за счет рассасывания накопленных в базе неосновных носителей заряда. Эффективное время жизни носителей заряда в базе диода определяется по формуле

$$\tau_{эф} = \varphi_T \frac{\delta t}{\delta U},$$

где δU и δt находятся в соответствии с рисунком 4.

При $t > t_3$ диффузная емкость уменьшается, основной становится барьерная емкость, и процесс разряда резко увеличивается.

Измерение барьерной емкости происходит на специальной установке.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Получите исследуемый диод, укажите в отчете его тип.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

ИДЕАЛИЗИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ

1. Определить дифференциальное сопротивление диода при прямом токе $I_f = 1$ мА.

Ручками управления "HORIZ. VOLTS/DIV" и "VERT. CURRENT/DIV" на характериографе установить масштабы: 0,1 В/дел, 0,2

мА/дел. С помощью ручек управления горизонтальным и вертикальным отклонением луча установить нулевую яркостную точку ВАХ, соответствующую нулевому напряжению на диоде, в левый нижний угол координатной сетки экрана.

Зарисовать на миллиметровке ВАХ в диапазоне токов от 0 до 2 мА. Центральная горизонтальная шкала экрана с мелкими делениями соответствует току $I_I=1$ мА. По ней произведите отсчет напряжения U_I . Ручкой управления вертикальным отклонением луча сместить изображение вверх на одно деление (0,2 мА), зарисовать на той же миллиметровке смещенную ВАХ, и по центральной горизонтальной линии измерить изменение напряжения ΔU .

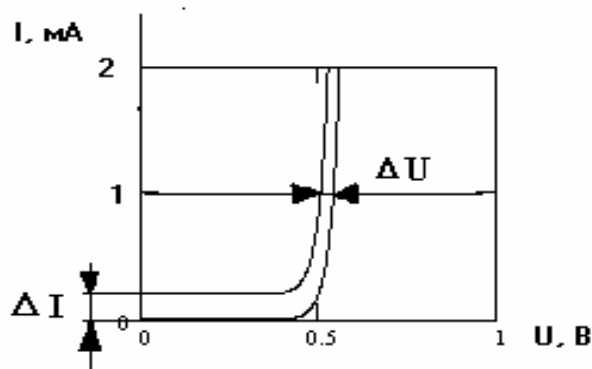


Рисунок 3.

Если ΔU мало (менее 0,02 В), то возможна большая ошибка в расчетах $r_{\text{диф}1}$. В этом случае рекомендуется увеличить ΔI , смещая изображение вверх не на одно, а на два деления (в этом случае $\Delta I=0,4$ мА). Тогда

$$r_{\text{диф}1} = \Delta U / \Delta I.$$

Найти сопротивление базы $r_{\text{б}1} = r_{\text{диф}1} - (\varphi_T / I_I)$, где $\varphi_T = 0,026$ В - тепловой потенциал при $T=300$ К. Полученное значение $r_{\text{диф}1} = r_{\text{б}1}$ приблизительно равно $r_{\text{б}}$ идеализированной модели диода.

2. Измерить прямое напряжение U_{np} при прямом токе $I_{np} = 10$ мкА (для этого рекомендуется установить масштаб: 0,1 В/дел., 2 мкА/дел). Произвести отсчет напряжения U_{np} по центральной горизонтальной линии (нулевая точка ВАХ должна быть в левом нижнем углу координатной сетки). Рассчитать параметр модели I_0 (тепловой ток) по формуле

$$I_0 = \frac{I_{np}}{\exp(U_{np}/\varphi_T)}$$

3. Определить по методике, аналогичной описанной в п.1, дифференциальное сопротивление диода $r_{\text{диф}2}$ при прямом токе $I_2 = 10$ мА. Для этого установите масштаб: 0,1 В/дел., 2 мА/дел. Найти сопротивление базы $r_{\text{б}2} = r_{\text{диф}2} - (\varphi_T / I_2)$, где $\varphi_T = 0,026$ В - тепловой потенциал, и сравните его со значением $r_{\text{б}1}$, полученным в п.1. Большое их отличие говорит о влиянии в данном диоде эффекта модуляции сопротивления базы.

МОДИФИЦИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ

4. Найти параметры m и $r_{\text{б}0}$ модифицированной модели по формулам

$$m = \frac{I_1(r_{\text{диф}1} - r_{\text{диф}2})}{\varphi_T \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right)}; \quad r_{\text{б}0} = r_{\text{диф}2} - \left(m \frac{\varphi_T}{I_2}\right).$$

5. Рассчитать параметр модифицированной модели I_0' по формуле

$$I_0' = \frac{I_1}{\exp[(U_1 - r_{\text{б}0}I_1)/m\varphi_T]}.$$

Сравните I_0' с I_0 , определенным в п.2.

6. Зарисовать на одном графике экспериментальную ВАХ и рассчитанные вольтамперные характеристики $I=f(U)$ идеализированной и модифицированной модели диода.

При этом необходимо отметить, что напряжение на переходе $u = U - I \cdot r_B$, где U - напряжение на диоде; I - ток через диод.

Поэтому расчет ВАХ необходимо производить, заменяя u в модели перехода на $U - I \cdot r_B$. Для упрощения расчетов рекомендуется произвести преобразования функции $I=f(U)$ на функцию $U=f(I)$. Расчеты производить для $I=0,1; 1; 3; 5; 10; 20$ мА.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

7. Поставить исследуемый диод в установку для измерения времени жизни носителей заряда в базе диода. Изменяя амплитуду импульса $U_{ги}$ генератора импульсов, установить прямой ток $I_{np}=10$ мА ($U_{зи}=40$ В, так как $R_I=4$ кОм). Рекомендуемый масштаб по оси напряжений на экране осциллографа – 0,05 В/дел. Временная диаграмма напряжения на диоде показана на рисунке 4.

Скачок $\Delta U = r_B \cdot I_{np}$ обусловлен уменьшением падения напряжения на сопротивлении базы при изменении тока от I_{np} до 0 в момент прохождения заднего фронта импульса. После окончания импульса происходит разряд диффузионной ёмкости. Зарисовать осциллограмму напряжения на диоде с указанием масштабов по осям. Найти сопротивление базы по формуле

$$r_B = \frac{\Delta U}{I_{np}}$$

и сравнить его со значением $r_{б2}$, найденным в п. 3

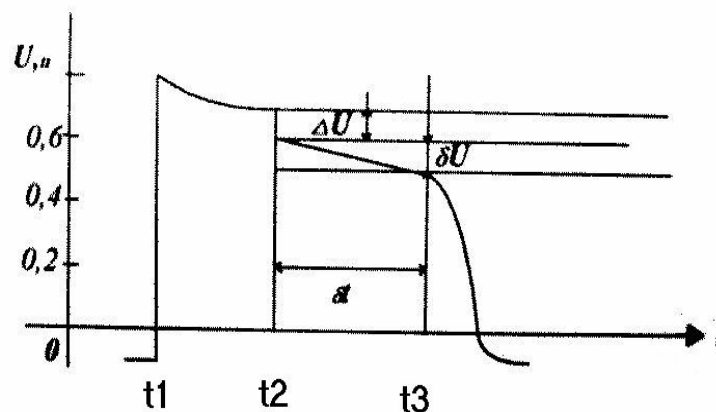


Рисунок 4.

7. По осциллограмме найти эффективное время жизни носителей заряда в базе диода. Для этого на экране осциллографа "крупным планом" установить картинку, соответствующую интервалу времени t_2-t_3 , и, выбрав на нем линейный участок, удобный для измерения интервал времени δt , определить соответствующий ему интервал напряжений δU . Рассчитать эффективное время жизни носителей заряда в базе диода по формуле

$$\tau_{эф} = \varphi_T \frac{\delta t}{\delta U}$$

8. Присоединить диод к установке для измерения барьерной емкости и снять вольт-фарадную характеристику диода в диапазоне обратных напряжений 0...10 В. Рекомендуемые значения напряжений 0; -1; -3; -6; -10 В. Для каждого значения напряжения ручкой $R_{бал}$ (сопротивление балансировки) получить минимальное показание стрелочного прибора "Индикатор" и отсчитать значение емкости по лимбу "Отсчет". Построить вольт-фарадную характеристику диода.

Форма вольт-фарадной характеристики диода определяется законом распределения примесей в $p-n$ переходе и аппроксимируется зависимостью:

$$C_{бар}(U) = \frac{C_0}{\left(1 - \frac{U}{\varphi_0}\right)^n}, \quad C_0 = C_{бар}(0),$$

$n = 2 \dots 1$ – параметр, зависящий от типа $p-n$ перехода ($n=0,5$ В для ступенчатого распределения примесей; $n=0,3$ В для линейного распределения примесей),

$\varphi_0 = 1$ В – высота потенциального барьера перехода.

Параметр n определить методом наименьших квадратов по формуле:

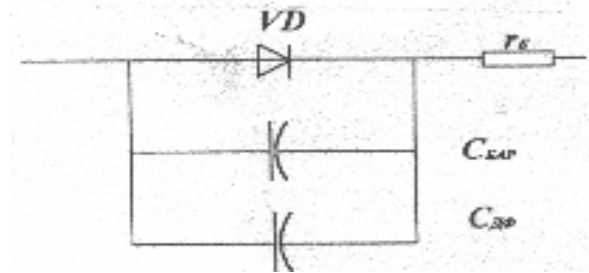
$$n = \frac{\sum_{i=1}^m \ln\left(1 - \frac{U_i}{\varphi_0}\right) \ln\left(\frac{C_0}{C_{бар}(U_i)}\right)}{\sum_{i=1}^m \ln^2\left(1 - \frac{U_i}{\varphi_0}\right)},$$

где U_i – значения напряжений, выбранных при измерениях вольт-фарадной характеристики диода.

9. Рассчитать диффузионную емкость диода для двух значений прямого тока 10 мкА и 10 мА по формуле:

$$C_{\text{дф}} = I \frac{\tau_{\text{эф}}}{\varphi_T}$$

10. Зарисовать модель диода и привести сводные таблицы ее параметров:



Для идеализированной модели:

$$I = I_0 \left(\exp \left[\frac{u}{\varphi_T} \right] - 1 \right)$$

I_0 ;

$r_B = r_{B1}$;

C_0 ; $\tau_{\text{эф}}$;

n .

Для модифицированной модели:

$$I = I'_0 \left(\exp \left[\frac{u}{m \varphi_T} \right] - 1 \right)$$

I'_0 ;

m ;

$r_B = r_{B0}$