

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ПОЛЕВОЙ МОДЕЛИ ДИОДА

С.П. Лохов, А.Е. Тураев
г. Челябинск, ЮУрГУ

Сравниваются переходные характеристики реального полупроводникового диода и результаты моделирования на ЭВМ р-п-перехода как управляемого сопротивления со смещениями, что приближает исследуемые процессы к полемому триоду.

В рамках предложенной в работе [1] математической модели инерция накоплений силовых объемных зарядов заменена на инерцию процессов управления параметрами канала. Отсюда и термин: полевая модель, хотя с общих позиций модели без учета физики процессов называют «моделями черного ящика». Дополнительно учтены пока постоянная емкость C_d перехода, а также – инерции входов вертикальной $W_y(p)$ и горизонтальной $W_x(p)$ разверток осциллографа. Получено хорошее совпадение результатов моделирования не с недоступными для наблюдения процессами в диоде, а с процессами в лабораторной установке для исследования этих процессов.

Согласно предложениям в [1] полевая модель на рис. 1 включает в себя три безынерционных по силовым сигналам (напряжение на них и ток через них) элемента: r_{pn} – дифференциальное сопротивление p - n -перехода, генераторы напряжения (E_{pn}) и тока (I_{pn}). Объемное сопротивление базы r_d и емкость C_d следует отнести к неидеальностям p - n -перехода и считать элементами модели уже диода, а не p - n -перехода. В статическом состоянии генераторы работают в режиме полной компенсации напряжения u_d и тока i_d рабочей точки p - n -перехода, поэтому $E_{pn} = u_d$, $I_{pn} = i_d$ и ток $i_{pn} = 0$. Можно переключить генератор тока строго параллельно сопротивлению r_{pn} , а генератор напряжения – последовательно с ними. Это несколько изменит характер процессов, но как лучше – пока не ясно. Каждая рабочая точка принадлежит вольт-амперной характеристике (ВАХ) p - n -перехода при любом ее математическом описании

с учетом всех пока неучтенных тонкостей влияний температуры, радиации, явлений пробоя. В исследованиях принят упрощенный вариант «распрямленной экспоненты» с экспонентой в центральной части и прямыми по краям

$$I_{pn} = I_o \cdot \left(e^{\left(\frac{E_{pn}}{f_i} \right)} - 1 \right). \tag{1}$$

Здесь $f_i = 0,026 \cdot M$ В (при температуре 300 К для кремния) – температурный потенциал [2], $M = 1-2,5$ – эмпирический поправочный коэффициент, I_o – обратный тепловой ток. Если взять из справочника номинальные значения напряжения U_{dn} и тока I_{dn} диода и его эквивалентное напряжение отсечки U_{do} (точка пересечения касательной к номинальной точке ВАХ с осью абсцисс), то объемное сопротивление базы и уравнение прямой (первая ключевая идея [1]) для протекания быстрых процессов $u_d(t)$, $i_d(t)$ (без тока емкости C_d)

$$r_d = \frac{(U_{dn} - U_{do} - f_i)}{I_{dn}},$$
$$(u_d - E_{pn}) = (i_d - I_{pn}) \cdot r_{pn}. \tag{2}$$

Пять параметров U_{dn} , I_{dn} , U_{do} , I_o , M определили статическую ВАХ диода. Формулы зависимости I_o , f_i от температуры имеются в справочниках.

В динамике взаимосвязанные формулой (1) E_{pn} и I_{pn} работают как медленные регуляторы поддержания нулевого значения тока i_{pn} – вторая ключевая идея [1]. Также влияет на динамику емкость C_d . При всей простоте идеи трудно дать точные ре-

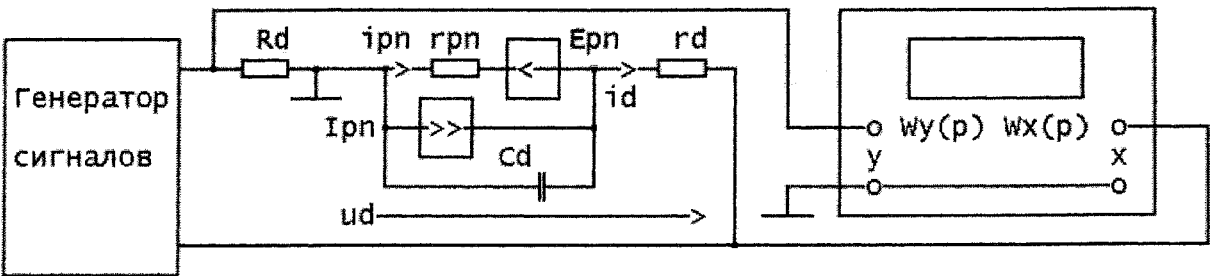


Рис. 1. Схема модели р-п-перехода и лабораторной установки

комендации по реализации регуляторов. При эксперименте использованы следующие интегральные регуляторы с логическими переключениями:

Если $u_d > 0$, то $di_{pn}/dt = i_{pn}/T_i$; (3а)

если $u_d < 0$, то $dE_{pn}/dt = r_{pn} \cdot i_{pn}/T_e$; (3б)

если $dE_{pn}/dt > 0$, то $dE_{pn}/dt \leq K_{ve} \cdot dE_{pn}/d$; (3в)

если $di_{pn}/dt > 0$, то $di_{pn}/dt \leq K_{vi} \cdot di_{pn}/dt$. (3г)

Для упрощения приняты равные постоянные интегрирования $T_e = T_i$ и коэффициенты выключения $K_{ve} = K_{vi}$. Таким образом, динамика добавила нам три параметра T_e , K_{ve} , C_d и некоторое разнообразие логических условий. Далее подбором всех параметров удалось получить приемлемое совпадение экспериментальных осциллограмм с рассчитанными на ЭВМ переходными процессами, но... Не получилось даже качественное совпадение процессов на фазовой плоскости в осях тока и напряжения.

Главным виновником оказалось несовпадение динамических характеристик осциллографа по

входам x и y , $W_x(p)$ и $W_y(p)$. Почти полное качественное совпадение процессов на фазовых плоскостях удалось получить при аппроксимации передаточных функций входов уравнениями

$$T_x^2 \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + 2 \cdot a \cdot T_x \cdot \frac{dx}{dt} + x = u_d ; \tag{4а}$$

$$T_y^2 \cdot \frac{d^2y}{dt^2} + 2 \cdot a \cdot T_y \cdot \frac{dy}{dt} + y = i_d . \tag{4б}$$

При этом постоянные времени отличались в два раза при равенстве коэффициентов колебательности $a = 0,4$.

На следующем рисунке приведены результаты моделирования диода на ЭВМ. Экспериментальная осциллограмма приведена на рис. 3, она качественно совпала с результатами моделирования на рис. 2 а, б даже в мелкой «бородe» после фронтов. Интересно сравнить диаграммы u_d и x , i_d и y – без и с учетом паразитных фильтров (4) на входах осциллографов. Мы видим либо полное

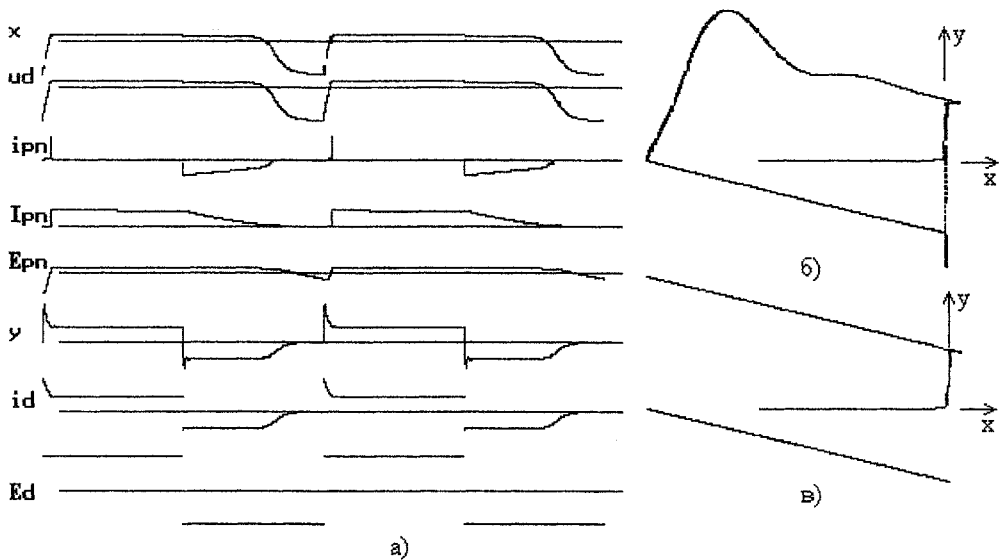


Рис. 2. Результаты моделирования в функции времени (а), фазовая траектория с фильтрами осциллографа (б), фазовая траектория без фильтров (в)

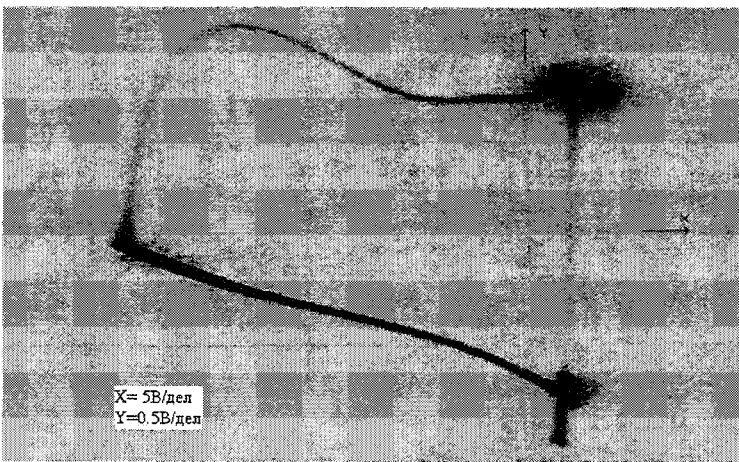


Рис. 3. Экспериментальная осциллограмма

совпадение, либо незначительное отличие диаграмм. Тем разительнее качественное несовпадение фазовых диаграмм этих же сигналов на рис. 2 б и 2 в. Надо напомнить, что постоянные времени T_x , T_y малы, и мы почти не видим влияния фильтров (4) на временных диаграммах, тем разительнее их влияние на фазовые диаграммы. Когда на мониторе была получена диаграмма рис. 2 в, а эксперимент показал на экране осциллографа почти рис. 2 б, то энтузиазм автора двух ключевых идей [1] заметно поубавился. Учет моделей фильтров (4) приподнял настроение.

Данные лабораторной установки: генератор сигналов специальной формы Г6-31, осциллограф

С1-83, диод кремниевый КД203А, резистор 100 Ом МЛТ-0.5.

Литература

1. Лохов, С.П. Компьютерная модель р-п-перехода и методы расчета / С.П. Лохов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2003. – Вып. 3. – №11(27). – С. 50–52.
2. Степаненко, И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем / И.П. Степаненко. – М.: Энергия, 1967. – 616 с.
3. Пасынков, В.В. Полупроводниковые приборы / В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин, А.Д. Шинков. – М.: Высшая школа, 1973. – 398 с.

Лохов Сергей Прокопьевич, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок ЮУрГУ, доктор технических наук, профессор. Выпускник кафедры электропривода ЧПИ 1968 г. Научные интересы связаны с теоретическими основами электротехники и моделированием электромеханических систем.

Тураев Андрей Евгеньевич, инженер кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок ЮУрГУ. Выпускник кафедры электропривода ЧПИ 1988 г. Научные интересы связаны с компьютерными системами.