

аппаратный комплекс «ИСУМ-1» (рис. 2). Конструктивно устройство состоит из электронного блока со специальным программным обеспечением и датчика.

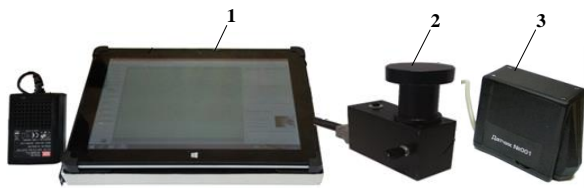


Рисунок 2 – Программно-аппаратный комплекс «ИСУМ-1»:

1 – электронный блок; 2 – датчик для контроля пространственно-армированных УМ; 3 – датчик для контроля изотропных УМ;

Прибор «ИСУМ-1» может работать в двух модификациях: как средство измерения изотропных УМ, либо в качестве измерителя свойств элементов структуры пространственно-армированных композиционных УМ. В первом случае комплектация устройства предполагает наличие датчика 2, обеспечивающего проведение измерений с одной фиксированной предударной скоростью в диапазоне 0,15 – 1 м/с, а в другом – датчика 3, который благодаря наличию оптической системы, позволяет осуществить точное позиционирование первичного измерительного преобразователя относительно локальной зоны контроля (матрицы

или армирующего волокна) и предусматривает оперативную регулировку величины предударной энергии от 20 до 50 мкДж.

Программно-аппаратный комплекс прошел сертификацию в Республике Беларусь, в результате которой подтвердил возможность измерения твердости УМ в диапазоне 20 – 550 МПа с погрешностью $\pm 8\%$ и модуля упругости в диапазоне 0,5 – 65 ГПа с погрешностью $\pm 10\%$. Для метрологической поверки прибора был аттестован набор контрольных образцов изотропных УМ и разработаны два стандарта [2, 3], устанавливающих порядок определения физико-механических характеристик методом индентирования и регламентирующих метрологический контроль средств измерений, реализующих метод контактного деформирования.

Литература

1. Рудницкий, В.А. Испытание эластомерных материалов методами индентирования/ В.А. Рудницкий, А.П. Крень; под. ред. П.П. Прохоренко. – Минск: Белорус. наука, 2007. – 227 с.
2. Контроль неразрушающий. Определение физико-механических характеристик конструкционных материалов методами индентирования: СТБ 2495-2017.– Введ. 01.09.2017. – Мн. : Госстандарт, 2017. – 40 с.
3. Системы космические. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования. Общие требования: ГОСТ Р 56474-2015. – Введ. 01.01.2016. – М.: Стандартинформ, 2015. – 19 с.

УДК 621.382.2:53.072

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Шумило В.С., Сычик В.А., Уласюк Н.Н.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

В связи с эффективным внедрением интегральной технологии в производство многофункциональных измерительных преобразователей (ИП), сформированных на основе полупроводниковых приборных структур, резко возрастает количество пленочных компонентов. В процессе разработки ИП тепловых излучений возрастает необходимость анализа и параметрической оптимизации переходных характеристик таких структур.

Решение данных вопросов при минимальных вычислительных затратах производим с помощью макромодулей полупроводниковых ИП (ПИП), воспроизводящих с достаточной степенью адекватности поведение схемы ИП для входных, передаточных и выходных характеристик.

При формировании электрической модели ПИП тепловых излучений используем принципы упрощения, на основании которых синтезируем формальные и блочные их макромодели.

Обобщенную схему формальной модели ПИП формируем из следующих блоков (рис. 1, а): входного, реализующего динамические входные характеристики и функцию преобразования; промежуточного, обеспечивающего заданные динамические характеристики и статическую передаточную характеристику; выходного, воспроизводящего выходную характеристику. При этом входные и выходные блоки представляют соответственно входные и выходные цепи моделируемых элементов базисов преобразователей, а промежуточный блок описывается аналитическими выражениями или эквивалентными схемами. Поскольку входные характеристики ИП имеют обычно нелинейный комплексный характер, то генератор тока с входным сопротивлением должен выражаться функцией вида $R_{вх} = f(U_{вх}, t)$.

Электрическую модель преобразователя тепловых излучений (ПТИ) (рис. 1, б) формируем в соответствии со структурной схемой (рис. 1, а).

Схема входного блока ПТИ (рис. 1, з) включает $R_{вх} = R_{вх\ n} + R_{вх\ y}$ и источник тока $I_{вх}$. Составляющая $R_{вх\ y}$ отражает характер изменения электрических свойств входного блока при воздействии преобразуемого теплового излучения $N_{Z(вх)}$, а $R_{вх\ n}$ – независимая от преобразуемого воздействия составляющая, учитывающая изменения параметров других элементов блока. Промежуточный блок (элементы E_1, R_1, C_1) реализует передаточную и переходную характеристики. Динамические свойства схемы ПТИ реализуются в блоке задержек макромоделей, который в соответствии со статической передаточной характеристикой определяет длительность задержки выходного сигнала ИП.

Выходной блок, основной функцией которого является воспроизведение статических выходных характеристик $I_{вых} = f(U_{вых})$, как обязательный элемент содержит источник тока $I_{вых}$, задающий соответственно выходной ток. В схему замещения также входит выходное сопротивление $R_{вых}$, изменение которого учитывается путем включения в выходную цепь зависимого источника напряжения E_2 .

Для создания макромоделей полупроводниковых измерительных преобразователей способом исключения отдельных компонентов из схемы ИП в различных режимах работы используем теорию чувствительности [1]. При формировании макромоделей ИП тепловых излучений интенсивности $N_{вх}$ (рисунок 1,б) производим сравнение чувствительности выходного напряжения со всеми параметрами элементов схемы ИП для 3-х участков статической передаточной характеристики $U_{вых} = f(N_{вх})$ (1, 2, 3). Для каждого участка выделяем главные элементы, чувствительность которых намного выше, чем других. Главные элементы затем включаем в макромодель, а вспомогательные не рассматриваются.

Формальную электрическую модель многовходового ПТИ с логической функцией преобразования описываем статической $I_{вх\ i}(U_{вх\ i})$ и динамической $I_{вх\ i}(U_{вх\ i}, dU_{вх\ i}/dt)$ – входной характеристиками, статической передаточной характеристикой при холостом ходе на выходе

$$U_{вых\ j}(U_i) = 1 \div m, j = 1 \div n.$$

Структура синтезированной формируемой макромоделей многовходового ПТИ представляет эквивалентную схему m-входных и n-выходных блоков (рисунок 1,д). Источник тока $I_{вх\ i}$ моделирует статическую емкость $C_{вх\ i}$ – динамическую входную характеристику ИП. Источник напряжения E_i моделирует статическую передаточную характеристику $U_{вых}(U)$, где определяющее напряжение U есть функция входных переменных. С помощью выходной $R_j C_{вых\ j}$ – цепи моделируется переходная характеристика j-го выхода. Значение напряжения источника равно напряжению на

емкости, а в статическом режиме – напряжению источника E_i . Источник тока $I_{вых\ j}$ позволяет учесть нагрузочную способность элемента.

Все блоки, моделирующие статические характеристики ПТИ, описываются кусочно-линейными функциями типа $y = a_k x + b_k, k = 1 \dots k$, где y – любая из функций, описывающих $I_{вх\ i}, E_j, I_{вых}$; x – соответствующие им аргументы $U_{вх\ i}, U_{вых\ j}, U$.

Чтобы с достаточной степенью точности смоделировать переходную характеристику ИП выделяем на ней несколько характерных участков, в каждом из которых задаем свою постоянную времени $\tau_j = R_j C_{вых\ j}$, причем обычно $R_j = \text{const}, C_{вых\ j} = \text{var}$.

Если достигнутая с помощью формальных макромоделей точность расчета невысока, используем адекватные (блочные и схемные) макромоделей, синтез которых в общем случае проводим на основе снижения порядка алгебродифференциальных уравнений, описывающих статику и динамику ИП.

Для многовходового ПТИ, работающего на RC – нагрузку (см. рис. 1, а), связь между входными и выходными напряжениями в адекватной модели получаем из решения системы уравнений Кирхгофа

$$U_{вых\ 1}(A_{11}d^2/dt^2 + A_{21}d/dt + 1) = U_{вх\ 1}(B_{11}d^2/dt^2 + B_{21}d/dt + 1) - U_{Э1},$$

$$U_{вых\ n}(A_{1n}d^2/dt^2 + A_{2n}d/dt + 1) = U_{вх\ n}(B_{1n}d^2/dt^2 + B_{2n}d/dt + 1) - U_{Эn}. \quad (1)$$

Здесь $U_{Эn} = \varphi_n \ln I_{ЭП} / I_{Э0}$ – напряжение на эмиттерном переходе; $I_{Э0}$ – статический эмиттерный ток:

$$A_{1n} = \tau_{Э}(\tau_{м\ вх} + R_1 C_{м\ вх})(1 + R_{м\ вх} / R_m);$$

$$A_{2n} = \tau_{Э}(1 + R_1 / R_m) + C_{м\ вх}(\tau_{Э} + R_{м\ вх}(1 + \tau_{Э} / R_m));$$

$$B_{1n} = \tau_{Э} \tau_{м\ вх};$$

$$B_{2n} = \tau_{Э} + \tau_{м\ вх}; \tau_{Э} = \tau_{Э}(C_{j0} + \tau_{ТН} \lambda I_{Э}); \tau_{м\ вх} = C_{м\ вх} R_{м\ вх}; \lambda = 1 / \varphi_T;$$

$\varphi_T / I_{Э} = \tau_{Э}; R_1 = R_{бп} + R_{ба}(C_{кп} / C_{jc})$ – приведенное сопротивление базы; $C_{м\ вх}, R_{м\ вх}$ – емкость и сопротивление, моделирующее входное сопротивление ПТИ.

Для расчетов параметров ИП с повышенной точностью коэффициенты

$A_{1n}, A_{2n}, B_{1n}, B_{2n}$ вычисляются на каждом временном шаге решения системы.

При составлении уравнений адекватной модели ПТИ сделаны следующие допущения: 1) исходные значения $I_0 = \text{const}, U_{0n} = \text{const}$;

2) параметры триодных структур ИП идентичны;

3) ВАХ эмиттерных переходов представлены в виде кусочно-линейной аппроксимации $U = \varphi_T \ln I_{Э} / I_{Э0} + i \tau_{Э}$.

При аппроксимативном снижении порядка результирующего алгебро-дифференциального уравнения использовались выражения, связывающие напряжение между внутренними базовыми точками входной и опорной триодных биполярных структур, а также напряжения на входе и выходе [2]

$$U_{\text{ББ}i} = (U_{\text{вх}i} - U_{\text{оп}} + d/dt C_1 R_2 (U_{ki} - U_n)) / (1 + g_{1i} + g_{2i}), \quad (2)$$

$$g_{1i} = (R_3 + R_1 / \beta + 1) g_{3i},$$

$$g_{2i} = R_2 C_1 (1 + g_{1i}) + (R_1 + R_2) (C_{jc} + \tau_{TN} \lambda g_{3i}),$$

$$g_{3i} = I_0 \exp \lambda U_{\text{ББ}i} / (1 + \sum \exp \lambda U_{\text{ББ}i}) (1 + \exp \lambda U_{\text{ББ}i}),$$

где $U_{\text{вх}i}$ – напряжение на входе i -ой триодной структуры m – входового ПТИ; $R_2 = R_{\text{Б}A} C_{\text{К}A} / C_{\text{J}C}$; $C_{\text{J}C}$ – включающая емкость коллектора триодной структуры ПТИ.

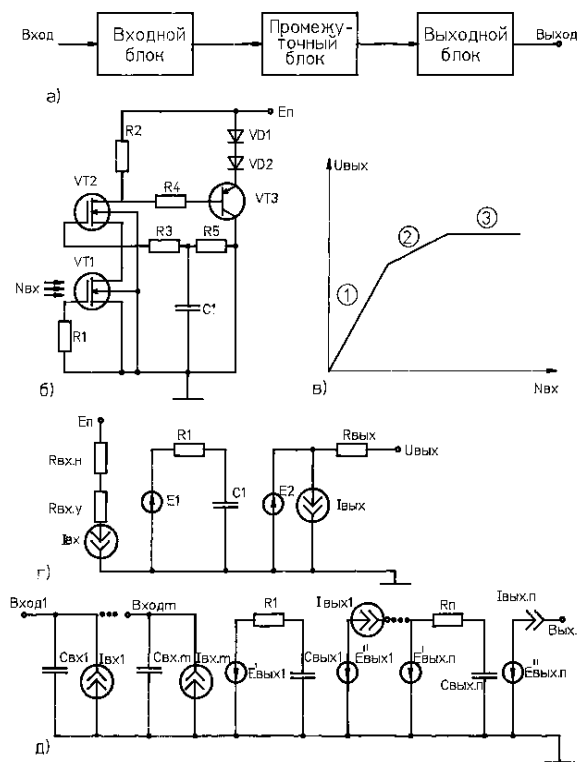


Рисунок 1 – (а) обобщенная структурная схема формальной модели ПТИ; (б) электрическая схема формальной модели ПТИ; (в) передаточная характеристика формальной модели ПТИ; (г) электрическая модель входного блока ПТИ; (д) обобщенная принципиальная схема формальной макромодели многовходового ПТИ

Зависимости коллекторных токов активного и опорного триодов от $U_{\text{ББ}i}$ в адекватной модели ПТИ представляются в виде

$$I_{ki} = I_0 - I_{\text{КП}}, \quad (3)$$

$$I_{\text{КП}} = I_0 / (1 + \sum \exp \lambda U_{\text{ББ}i}). \quad (4)$$

Для коллекторных узлов, к которым подключены емкости нагрузки C_n , выполняются следующие соотношения:

для прямого выхода

$$U_{\text{П}} (1 + C_n U_{\text{Л}} dI_0/dt) = U_{\text{Л}} / I_0 (I_{\text{КП}} - C_1 U_{\text{Н}} d/dt), \quad (5)$$

для инверсного выхода

$$U_{ki} (1 + C_n U_{\text{Л}} dI_0/dt) = U_{\text{Л}} / I_0 (I_{\text{КП}} + C_1 d(U_{\text{вх}i} - U_{ki})/dt). \quad (6)$$

Система уравнений (2)...(6) представляет адекватную модель многовходового ПТИ, выполненную блочной структурой. Каждый из блоков этой модели также описывается соответствующим уравнением (2)...(6), а последовательность использования уравнений в адекватной модели ИП осуществляется по заданному алгоритму.

Таким образом, электрические модели полупроводниковых преобразователей тепловых излучений позволяют эффективно использовать методики поэтапного проектирования, что обеспечивает объединение схмотехнического и логикофункционального этапов проектирования, причем необходимая часть структуры ИП может моделироваться на компонентном уровне, а другая – на уровне функциональных макромоделей.

Основными типами электрических макромоделей, используемых при моделировании многофункциональных полупроводниковых преобразователей тепловых излучений для точных расчетов характеристик синтезируемых структур, следует считать приближенные макромодели, которые строятся на основе более простой исходной схемы на компонентном уровне, и формальные макромодели, базирующиеся на формальной аппроксимации внешних характеристик многофункциональных ИП.

Литература

1. Бубенников А.Н. Физическое моделирование и технология полупроводниковых приборов и интегральных схем. – М.: Высшая школа, 1989. – 360 с.
2. Сычик В.А. Измерительные преобразователи излучений на основе полупроводниковых приборных структур. – Мн.: Вышэйшая школа, 1991. – 179 с.