

УЧЁТ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ИОНИЗИРУЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В SPICE-МОДЕЛЯХ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ И ДИОДОВ

К.О. Петросянц^{1,2}, Л.М. Самбурский^{1,2}, И.А. Харитонов¹, В.М. Олухов³

¹НИУ ВШЭ, Московский институт электроники и математики,
г. Москва

²Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН,
г. Москва

³ФГУП "НИИП", г. Москва

Импульсное ионизирующее воздействие вызывает ионизацию полупроводника, всплеск дополнительных фототоков через рабочие области полупроводниковых приборов и схем, в частности, через р-п-переходы структур транзистора и может приводить к сбоям в схемах.

При схемотехническом (SPICE) моделировании данного вида воздействия обычно используют или упрощенную модель фототока в виде генератора тока с двухэкспоненциальной функцией [1] или управляемые источники, имеющие сложные зависимости от времени и геометрических параметров структуры полупроводникового прибора в виде Verilog-A (или подобных) моделей [2]. Второй подход сильно усложняет SPICE модель, ухудшает совместимость модели с программами анализа, уменьшает скорость счета. Кроме того, для большинства дискретных полупроводниковых приборов, используемых в спец. стойкой аппаратуре, данные по конструктивно-технологическим параметрам их структур отсутствуют.

В данной работе предлагаются уточненные, но достаточно простые SPICE модели импульсных фототоков для диодов и биполярных транзисторов. Модели имеют единую структуру, учитывают электрическое смещение на р-п-переходе, особенности формы отклика конкретного полупроводникового прибора. Параметры моделей определяются из результатов испытаний на моделирующих установках.

Модель диода оформлена в виде макромодели и приведена на рис. 1,а. Значение тока дополнительного управляемого источника фототока G_EXPR_Puls рассчитывается по выражению

$$I_{G_expr_Puls} = K_0 \cdot V(node1) \cdot (V_{diod})^{K_v}, \quad (1)$$

где: $V(node)$ – напряжение в узле node1, численно равно мгновенному значению мощности дозы излучения;

K_0 – коэффициент связи фототока и мощности дозы,

V_{diod} – напряжение на диоде,

K_v – коэффициент зависимости фототока от напряжения на диоде.

Динамическими параметрами модели являются постоянные времени нарастания $\tau_{нар}$ и спада $\tau_{спада}$ импульса фототока.

Модель для биполярного транзистора приведена на рис. 1,б. Используются два дополнительных управляемых источника $G_EXPR_Pul_be$ и $G_EXPR_Pul_bc$ для переходов база–эмиттер и база–коллектор, соответственно. Значения токов этих источников рассчитываются по выражениям, аналогичным (1), но имеют различные значения параметров для переходов база–эмиттер и база–коллектор.

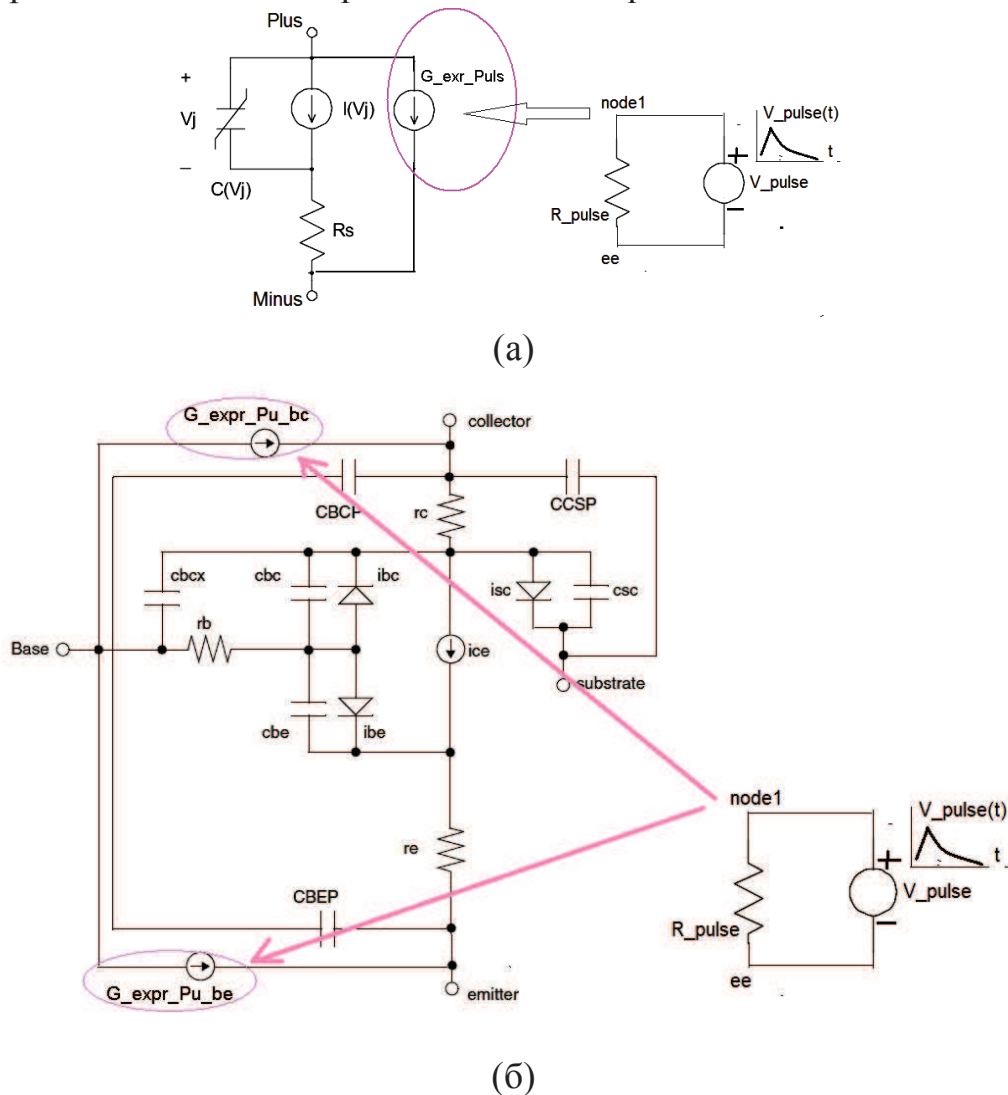


Рис. 1 Модели диода (а) и биполярного транзистора (б), учитывающие влияние импульсного ионизирующего излучения

Для определения параметров моделей проводились измерения импульсных фототоков диодов и транзисторов на установке РИУС-5 (рентгеновском импульсном ускорителе электронов) ФГУП «НИИП» [3]. Использовались схемы подключения испытываемых элементов для дистанционных измерений. Схема измерений фототока для перехода база–

коллектор биполярного транзистора приведена на рис. 2. Для диодов схема измерений аналогична. С помощью цифрового запоминающего осциллографа проводилась регистрация откликов на резисторе R1. Затем определялись фототоки при различных значениях напряжений на диодах и транзисторах и различной мощности дозы.

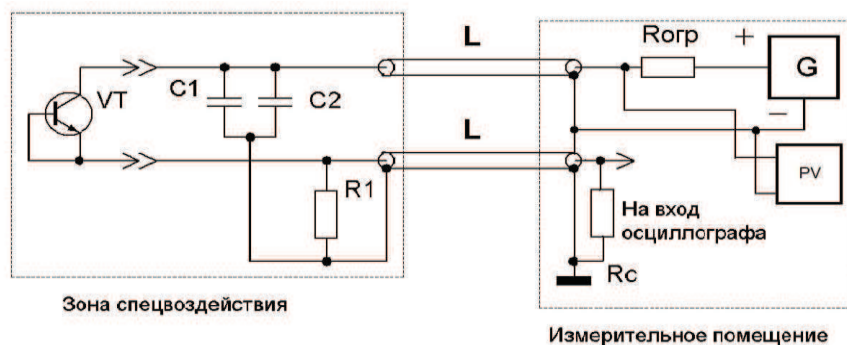


Рис. 2. Структурная схема измерения импульсных характеристик тока коллекторного перехода биполярного n-p-n транзистора при импульсном ионизирующем воздействии

Для иллюстрации на рис. 3 приведены измеренные и смоделированные переходные характеристики:

– тока отечественного диода средней мощности (максимальный постоянный прямой ток – 240 мА, максимальное постоянное обратное напряжение – 40В) (рис.3,а) и

– тока коллектора биполярного при транзистора средней мощности (максимально допустимый постоянный ток коллектора – 2 А, коэффициент передачи тока не менее 25) (рис.3,б).

Получены следующие значения параметров модели для диода:

$$K_0 = 2 \cdot 10^{-12} \text{ A/(P/c)}, K_v = 0,2, \tau_{\text{нар}} = 2,5 \text{ нс}, \tau_{\text{спада}} = 3 \text{ нс}.$$

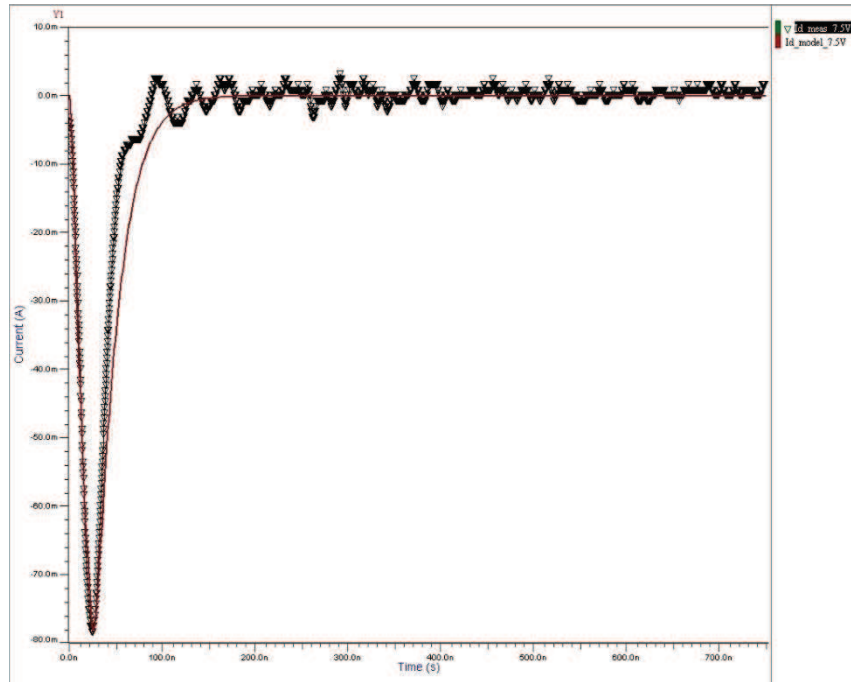
Для транзистора:

$$K_0 = 33 \cdot 10^{-12} \text{ A/(P/c)}, K_v = 0,24, \tau_{\text{нар}} = 13 \text{ нс}, \tau_{\text{спада}} = 80 \text{ нс}.$$

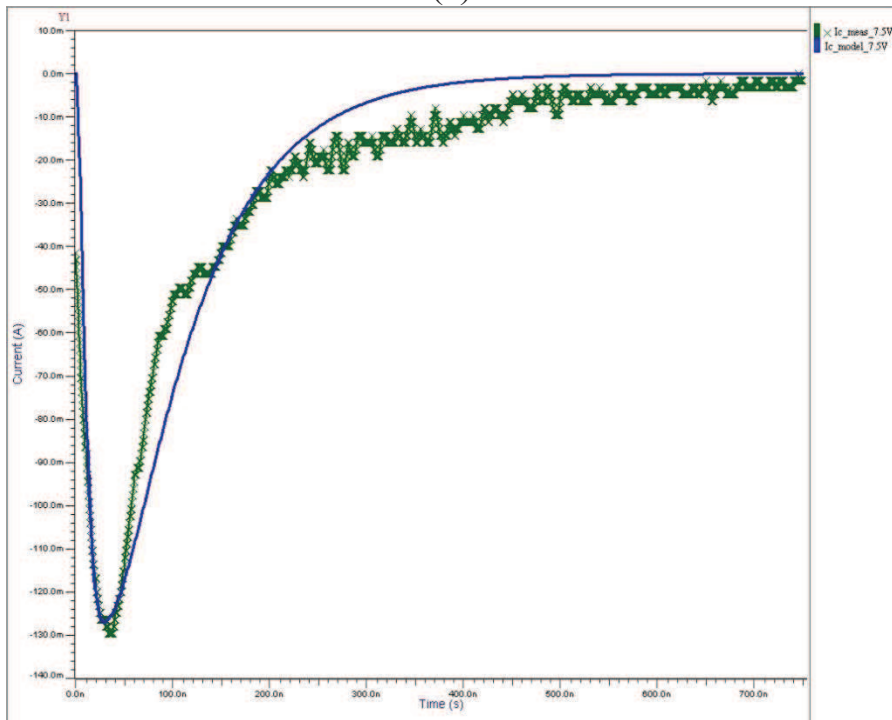
Предложенные SPICE модели диодов и транзисторов отработаны на наборе отечественных полупроводниковых приборов различной мощности. Погрешность моделирования импульсных фототоков не превышает 15–20% в диапазоне интенсивностей воздействия импульсного излучения до $1 \cdot 10^{10}$ P/c.

Литература

1. T. Wunsch and C. Axness Modeling the time-dependent transient radiation response of semiconductor junctions // IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 39, no. 6, pp. 2158-2169, 1992.
2. J. S. Kauppila Layout-aware modeling and analysis methodologies for transient radiation effects on integrated circuit electronics// Dissertation for the degree of doctor of philosophy, Vanderbilt University, 2015, Nashville, Tennessee.
3. http://www.niipriborov.ru/model_ustanov.html.



(а)



(б)

Рис. 3. Измеренные (линии) и смоделированные (значки) всплески фототока диода (а) и тока коллектора биполярного транзистора (б) при воздействии импульса установки РИУС-5 с средним уровнем $2 \cdot 10^9$ P/c и напряжении 7,5 В