

ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА СО СТАТИЧЕСКОЙ ИНДУКЦИЕЙ

Н. Л. Лагунович¹, д. т. н. А. С. Турцевич², д. ф.-м. н. В. М. Борздов³

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»;

²Министерство промышленности; ³Белорусский государственный университет
Республика Беларусь, г. Минск
office@bms.by

Приведены результаты приборно-технологического моделирования биполярного транзистора со статической индукцией, выполненного с помощью программного пакета SUPREM3 фирмы Silvaco и разработанного авторами программного комплекса MOD-1D. При этом была использована разработанная авторами одномерная модель прибора, учитывающая процессы Оже-рекомбинации и генерации носителей заряда вследствие межзонной ударной ионизации.

Ключевые слова: биполярный транзистор со статической индукцией, приборно-технологическое моделирование, фундаментальная система уравнений полупроводника, рекомбинация носителей заряда, межзонная ударная ионизация.

Биполярный транзистор со статической индукцией (БСИТ) представляет собой структуру с коротким каналом, работающую на полевом эффекте, и может применяться как в качестве дискретного прибора, так и в составе высоковольтных схем различного назначения, в том числе в составе AC/DC- и DC/DC-конвертеров, LED-драйверов, широко используемых в современной светотехнике. Весьма актуальной на сегодняшний день задачей является его моделирование в процессе разработки конструкции БСИТ и технологического маршрута его изготовления. При этом в ряде случаев необходимую точность обеспечивает одномерное моделирование, позволяющее значительно снизить затраты машинного времени.

В данной работе проведено одномерное приборно-технологическое моделирование биполярного транзистора со статической индукцией с коэффициентом усиления при включении по схеме с общим эмиттером не менее 200, пробивным напряжением «коллектор — эмиттер» свыше 100 В, напряжением «коллектор — эмиттер» в режиме насыщения менее 0,3 В.

Технологическое моделирование БСИТ было осуществлено с применением программного пакета SUPREM3 фирмы Silvaco [1], а его результаты послужили исходными данными для дальнейшего приборного моделирования с помощью созданного авторами программного комплекса MOD-1D [2]. В основе одной из его программ лежит разработанная авторами одномерная модель БСИТ в диффузионно-дрейфовом приближении, в состав которой входят:

— уравнение Пуассона

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = -\frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} (p - n + N_d - N_a), \quad (1)$$

— уравнения непрерывности для электронов и дырок

$$\frac{\partial J_n}{\partial x} - q(R - G) - q \frac{\partial n}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial J_p}{\partial x} + q(R - G) + q \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad (3)$$

где φ — электростатический потенциал; x — координата; p, n — концентрации электронов и дырок соответственно; q — заряд электрона; ε — относительная диэлектрическая проницаемость; ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; N_d, N_a — концентрация доноров и акцепторов; J_n, J_p — электронная и дырочная составляющие тока; t — время; R, G — скорость рекомбинации и генерации носителей заряда соответственно.

В выражениях (2) и (3) значения J_n и J_p задавались с учетом диффузионной и дрейфовой составляющих следующими выражениями:

$$J_n = qn\mu_n E + q\varphi_T \mu_n \frac{\partial n}{\partial x}, \quad (4)$$

$$J_p = qp\mu_p E + q\varphi_T \mu_p \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (5)$$

где μ_n , μ_p — подвижность электронов и дырок соответственно; E — напряженность электрического поля; $\varphi_T = k_B T/q$ — температурный потенциал; k_B — постоянная Больцмана; T — термодинамическая температура кристалла.

Предполагалось, что механизм рекомбинации как в объеме, так и на поверхности полупроводника описывается уравнением Шокли—Рида—Холла с учетом выражения, описывающего Оже-рекомбинацию [3]:

$$R = (pn - n_i^2) \left(\frac{1}{\tau_n(p+n_i) + \tau_p(n+p_i)} + c_n \cdot n + c_p \cdot p \right), \quad (6)$$

где n_i — собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике; τ_n , τ_p — время жизни электронов и дырок соответственно; c_n , c_p — коэффициенты Оже-рекомбинации.

Скорость генерации носителей заряда G , входящая в уравнения (2) и (3) и учитывающая процесс ударной ионизации Келдыша [4], рассчитывалась по формуле

$$G = \frac{A n w_\phi(\varepsilon_{\text{пор}}) \cdot m^*}{4(\pi \hbar)^3} \int_0^\infty \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{\text{пор}}}{\varepsilon_{\text{пор}}} \right)^2 \exp\left(-\frac{\varepsilon}{k_B T_{\text{эф}}}\right) d\varepsilon, \quad (7)$$

где A — безразмерная постоянная; ε — энергия; $w_\phi(\varepsilon_{\text{пор}}) = 10^{14} \text{ с}^{-1}$ — суммарная интенсивность рассеяния на фононах электронов с энергией, равной пороговой энергии; m^* — эффективная масса электрона; \hbar — редуцированная постоянная Планка; $T_{\text{эф}}$ — эффективная температура электронного газа.

По результатам моделирования БСИТ был разработан технологический маршрут его изготовления, получены экспериментальные образцы прибора и измерена его вольт-амперная характеристика для случая диодного включения транзистора (коллектор закорочен с базой). Полученное в результате расчетов пороговое напряжение прибора $U_{\text{пор}}$ при токе эмиттера 100 мА составило 0,61 В, а измеренное на экспериментальных образцах $U_{\text{пор}}$ оказалось равным 0,72 В, т. е. разность между расчетными и экспериментальными данными составила 0,11 В или 18%.

Таким образом, выполненное в рамках данной работы одномерное моделирование позволило определить такие параметры технологического маршрута формирования БСИТ, при которых значения электрических параметров прибора соответствуют заданным величинам с точностью до 18% (что удовлетворяет требованиям потребителя), а также сократить затраты машинного не менее, чем в 2,5 раза по сравнению с затратами, необходимыми при двухмерном моделировании.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. <http://www.silvaco.com>.
2. Компьютерная программа MOD-1D: а. с. 742 Респ. Беларусь / Н.Л. Лагунович; зап. в Реестре зарегистрированных в Нац. центре интеллектуал. собственности комп. программ 10.03.15.
3. Нелаев В.В., Стемпицкий В.Р. Основы САПР в микроэлектроник.— Минск: БГУИР, 2008.
4. Келдыш Л.В. Кинетическая теория ударной ионизации в полупроводниках // ЖЭТФ. — 1960. — Т. 37, вып. 3.— С. 713—727.

N. L. Lagunovich, A. S. Turtsevich., V. M. Borzdov

Device-process simulation of bipolar static induction transistor

The results of device-process simulation of the bipolar static induction transistor (BSIT) are presented in this research. The BSIT device-process simulation was performed with using program package SUPREM3 by Silvaco company and the software package MOD-1D developed by the authors. The MOD-1D package is based on the developed by the authors one-dimensional model, taking into account the processes of Auger recombination and generation of charge carriers owing to band-to-band impact ionization.

Keywords: bipolar static induction transistor, device-process simulation, fundamental system of semiconductor equations, charge carrier recombination, band-to-band impact ionization.