

УДК 621.382.33

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕГРАДАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК
КРЕМНИЕВЫХ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ТОНКОЙ БАЗОЙ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДЕФЕКТООБРАЗУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

© 2013 г.

В.К. Киселев¹, С.В. Оболенский², А.С. Пузанов¹¹НИИ измерительных систем им. Ю.Е. Седакова, Н. Новгород²Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

obolensk@rf.unn.ru

Поступила в редакцию 26.12.2012

Разработана аналитическая модель деградации статических и малосигнальных характеристик биполярных транзисторов с тонкой базой. Учтены воздействие радиационного излучения и баллистический предел скорости носителей заряда. Теоретически показано, что с уменьшением толщины базы менее 100 нм деградация статических характеристик транзистора уменьшается.

Ключевые слова: биполярный транзистор с тонкой базой, баллистический перенос носителей заряда, дефектообразующая радиация.

Введение

Основным направлением развития полупроводниковой электроники является сокращение рабочей области активных элементов, в частности, толщины базы биполярных транзисторов, что приводит к улучшению их частотных характеристик за счет уменьшения времени пролета базы электронами. Реализация баллистического транспорта электронов в базе позволила достичь предельных рабочих частот транзисторов свыше 300 ГГц [1].

Ранее [2] нами была предложена аналитическая модель переходных ионизационных процессов в кремниевых биполярных транзисторах с тонкой базой при воздействии фотонного импульсного излучения с учетом баллистического предела скорости неосновных носителей заряда. В данной работе проведено развитие аналитической модели переноса неосновных носителей заряда в тонкой базе биполярного транзистора на случай воздействия дефектообразующих излучений.

Математическая модель

Система уравнений для анализа переноса неосновных носителей заряда в тонкой базе дана в работе [3] и содержит уравнение непрерывности

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} \quad (1)$$

с модифицированными граничными условиями

$$n_p(0, t) - \frac{1}{2q\nu_R} j_n(0, t) = n_{p0} \exp\left(\frac{qU_{be}}{k_B T}\right), \quad (2)$$

$$n_p(L_b, t) - \frac{1}{2q\nu_R} j_n(L_b, t) = n_{p0} \exp\left(-\frac{qU_{cb}}{k_B T}\right) \quad (3)$$

и модифицированным выражением для плотности диффузионного тока неосновных носителей заряда

$$j_n(x, t) = qD_n \frac{\partial n_p(x, t)}{\partial x} - \frac{D_n}{4\nu_R^2} \frac{\partial j_n(x, t)}{\partial t}. \quad (4)$$

Здесь n_p – концентрация, n_{p0} – равновесная концентрация, D_n – коэффициент диффузии, j_n – плотность тока, τ_n – время жизни неосновных носителей заряда (электронов) в базе, q – заряд электрона, U_{be} – приложенное напряжение к переходу база–эмиттер, U_{cb} – приложенное напряжение к переходу база–коллектор, k_B – постоянная Больцмана, T – температура, L_b – толщина нейтральной области базы, x и t – текущие координата и время, $\nu_R = \sqrt{\frac{k_B T}{2\pi m^*}}$ – средняя скорость, m^* – эффективная масса неосновных носителей заряда. Величина $D_n/4\nu_R^2$ представляет собой среднее время между столкновениями электронов с кристаллической решеткой.

Радиационно-зависимыми параметрами предложенной модели являются D_n и τ_n , что обусловлено увеличением темпа рассеяния и рекомбинации носителей заряда на вводимых облучением заряженных дефектах. В коротких структурах время пролета рабочей области транзистора существенно меньше времени жизни неосновных носителей заряда, поэтому рекомбинация практически подавлена, а доминирующим механизмом деградации при радиационном воздействии является снижение коэффициента диффузии электронов (рис. 1).

Рассмотрим частные случаи.

В стационарном режиме все производные $\partial/\partial t \equiv 0$ и выражение для плотности коллектор-

ного тока транзистора с тонкой базой в приближении полного подавления рекомбинации и $qU_{cb} \gg k_B T$ записывается в виде

$$j_c = \frac{qD_n n_{p0}}{L_b + \frac{D_n}{v_R}} \exp\left(\frac{qU_{be}}{k_B T}\right). \quad (5)$$

От стандартной зависимости полученное соотношение отличает наличие слагаемого $\frac{D_n}{v_R}$ в

знаменателе предэкспоненциального множителя.

В малосигнальном режиме все динамические параметры, такие, как концентрация и плотность тока неосновных носителей заряда, представляются в виде

$$n_p(x, t) = n_p(x) + \overline{n_p(x)} \exp(j\omega t), \quad (6)$$

$$j_n(x, t) = j_n(x) + \overline{j_n(x)} \exp(j\omega t), \quad (7)$$

где $n_p(x)$ и $j_n(x)$ – стационарные пространственные распределения концентрации и плотности тока неосновных носителей заряда соответственно, а $\overline{n_p(x)}$ и $\overline{j_n(x)}$ – комплексные малосигнальные распределения указанных параметров.

Коэффициент переноса неосновных носителей заряда через базу характеризует потери при их движении от эмиттера к коллектору [5] и является отношением электронной составляющей коллекторного тока к электронной составляющей эмиттерного тока (для n-p-n транзистора). Коэффициент переноса определяет поведение биполярного транзистора во всем частотном диапазоне. Для транзистора с тонкой базой выражение для коэффициента переноса записывается в виде

$$\beta(\omega) = 1 / \left[\cosh \left[\sqrt{\frac{1}{D_n \tau_n} \left(1 + \frac{j\omega D_n}{4v_R^2} \right)} (1 + j\omega \tau_n) L_b \right] + \frac{1}{2v_R} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \frac{1 + j\omega \tau_n}{1 + \frac{j\omega D_n}{4v_R^2}} \times \right. \\ \left. \times \sinh \left[\sqrt{\frac{1}{D_n \tau_n} \left(1 + \frac{j\omega D_n}{4v_R^2} \right)} (1 + j\omega \tau_n) L_b \right] \right]. \quad (8)$$

Отметим, что радиационное изменение времени жизни неосновных носителей заряда в биполярных транзисторах с тонкой базой невелико, так как изначально используются структуры с малым (~1 нс) временем жизни.

Коэффициент усиления в схеме включения с общим эмиттером рассчитывается по стандартной формуле [5]

$$\alpha_3(\omega) = \frac{\beta(\omega)}{1 - \beta(\omega)}. \quad (9)$$

Отметим, что статическое (5) и малосигнальное (8) решения задачи переходят в известные формулы для низкочастотного биполярного транзистора при толщине базы, существенно большей характерных масштабов бесстолкновительного движения неосновных носителей заряда, то есть $L_b \gg \frac{D_n}{v_R}$.

Результаты расчетов и их обсуждение

Как и следует ожидать, с уменьшением толщины базы биполярного транзистора влияние процесса диффузии на перенос неосновных носителей заряда в базе уменьшается. При неограниченном сокращении толщины базы плотность тока коллектора стремится к баллистическому пределу

$$j_{ball} = qv_R n_{p0} \exp\left(\frac{qU_{be}}{k_B T}\right) \quad (10)$$

и *не зависит* от деградации коэффициента диффузии при воздействии дефектообразующих излучений. Зависимость относительной деградации тока коллектора кремниевого биполярного транзистора от толщины базы в приближении полного подавления рекомбинации при воздействии дефектообразующих излучений представлена на рис. 2. Из рисунка видно, что при уменьшении толщины базы менее 100 нм относительная деградация статических характеристик биполярного транзистора снижается, что обуславливает более высокую радиационную стойкость субмикронных структур.

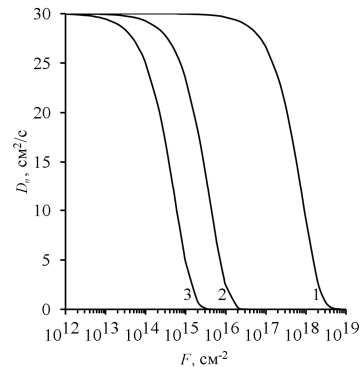


Рис. 1. Зависимость коэффициента диффузии электронов в кремнии от флюенса различных видов дефектообразующих излучений: 1 – γ -кванты ^{60}Co ; 2 – электроны с энергией 10 МэВ; 3 – быстрые нейтроны. График получен с использованием соотношения Эйнштейна исходя из аппроксимации данных по деградации подвижности, приведенных в [4]

При анализе деградации малосигнальных характеристик биполярных транзисторов традиционно выделяют области низких ($\omega\tau_n \ll 1$) и высоких ($\omega\tau_n \gg 1$) частот.

В области низких частот коэффициент усиления биполярного транзистора с тонкой базой записывается в виде

$$\beta(0) = \frac{1}{\cosh\left(\sqrt{\frac{1}{D_n\tau_n}}L_b\right) + \frac{1}{2v_R} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \sinh\left(\sqrt{\frac{1}{D_n\tau_n}}L_b\right)}. \quad (11)$$

Зависимость низкочастотного коэффициента усиления кремниевого биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером от толщины базы при различных значениях коэффициента диффузии и времени жизни неосновных носителей заряда представлена на рисунке 3. Из графика следует, что снижение коэффициента диффузии и времени жизни неосновных носителей заряда в базе при воздействии дефектообразующих излучений приводит к уменьшению коэффициента усиления транзистора на низких частотах.

В области высоких частот коэффициент усиления биполярного транзистора монотонно уменьшается, и предпочтительными для работы являются частоты, не превосходящие $1/\tau_n$. Поэтому еще раз подчеркнем, что изготовители транзисторов стремятся изначально уменьшить время жизни неосновных носителей заряда в базе, и его радиационное изменение будет пренебрежимо мало.

Для примера рассмотрим изменение коэффициента усиления биполярного транзистора с 30 нм базой при воздействии дефектообразующих излучений (рис. 4). Отметим различие в результатах расчета модуля коэффициента усиления во всем частотном диапазоне, проведенного с учетом и без учета явления баллистического ограничения скорости неосновных носителей заряда в базе.

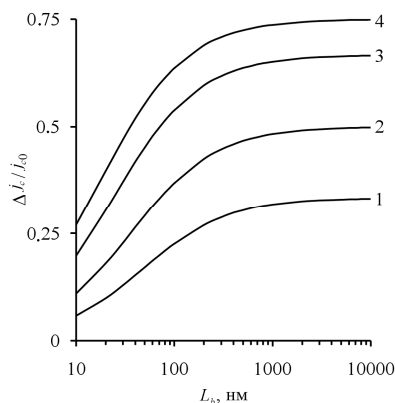


Рис. 2. Относительная деградация тока коллектора биполярного транзистора с тонкой базой в приближении полного подавления рекомбинации при снижении коэффициента диффузии: 1 – в 1.5 раза; 2 – в 2 раза; 3 – в 3 раза; 4 – в 4 раза

Из графиков видно, что уменьшение по абсолютной величине модуля коэффициента усиления биполярного транзистора при воздействии дефектообразующих излучений не зависит от рабочей частоты транзистора. Поэтому при анализе деградации модуля коэффициента усиления можно использовать выражение (11) во всем частотном диапазоне. Относительное изменение модуля коэффициента передачи биполярного транзистора при воздействии дефектообразующих излучений с ростом частоты увеличивается вследствие частотной зависимости модуля коэффициента передачи.

В настоящее время не существует устоявшейся модели фазо-частотных характеристик биполярных транзисторов с тонкой базой. В работе [6] утверждается, что результаты расчета фазо-частотных характеристик по аналитическим моделям расходятся с моделированием методом Монте-Карло при $\phi > \pi$, в то время как расчет амплитудно-частотных характеристик транзистора по данной аналитической модели совпадает с моделированием методом Монте-Карло во всем частотном диапазоне. Предполагается [7], что причиной расхождения расчетов фазо-частотных характеристик по аналитическим моделям и методом Монте-Карло является отклонение функции распределения скорости носителей заряда от распределения Максвелла. Однако в этом случае неясно, почему деформация функции распределения неосновных носителей заряда в тонкой базе затрагивает только фазо-частотные характеристики, но не оказывает влияния на амплитудно-частотные характеристики транзистора, а также неизвестна зависимость степени деформации функции распределения от частоты переменной составляющей сигнала.

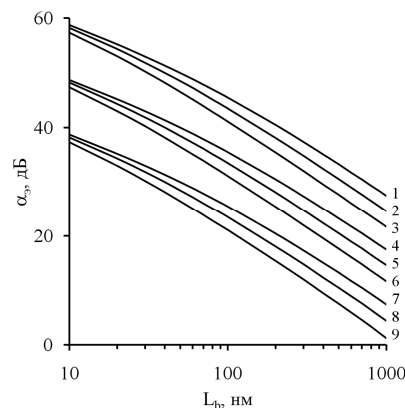


Рис. 3. Низкочастотный коэффициент усиления биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером при различных коэффициентах диффузии и времени жизни неосновных носителей заряда в базе: 1 – $D_n = 30 \text{ см}^2/\text{с}$, $\tau_n = 100 \text{ нс}$; 2 – $D_n = 15 \text{ см}^2/\text{с}$, $\tau_n = 100 \text{ нс}$; 3 – $D_n = 7.5 \text{ см}^2/\text{с}$, $\tau_n = 100 \text{ нс}$; 4 – $D_n = 30 \text{ см}^2/\text{с}$, $\tau_n = 10 \text{ нс}$; 5 – $D_n = 15 \text{ см}^2/\text{с}$, $\tau_n = 10 \text{ нс}$; 6 – $D_n = 7.5 \text{ см}^2/\text{с}$, $\tau_n = 10 \text{ нс}$; 7 – $D_n = 30 \text{ см}^2/\text{с}$, $\tau_n = 1 \text{ нс}$; 8 – $D_n = 15 \text{ см}^2/\text{с}$, $\tau_n = 1 \text{ нс}$; 9 – $D_n = 7.5 \text{ см}^2/\text{с}$, $\tau_n = 1 \text{ нс}$

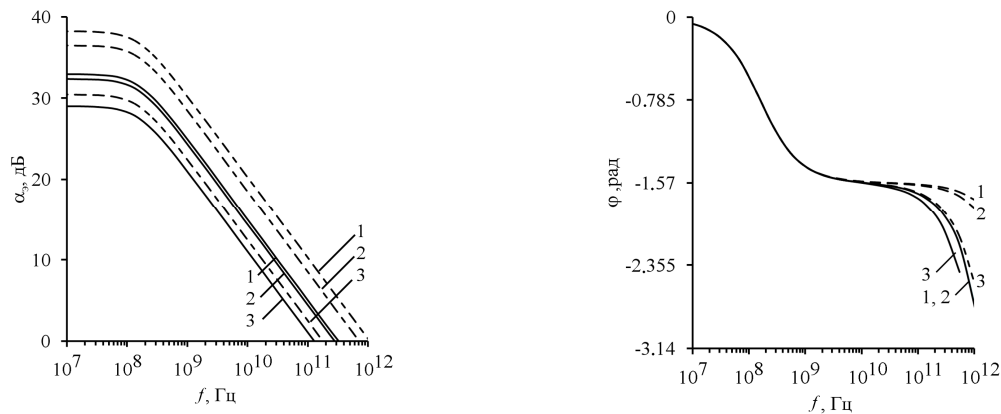


Рис. 4. а) модуль и б) фаза коэффициента усиления кремниевого транзистора с 30 нм базой в схеме включения с общим эмиттером с учетом (—) и без учета (---) баллистического ограничения скорости неосновных носителей заряда при коэффициенте диффузии: 1 – 30 см²/с; 2 – 20 см²/с; 3 – 5 см²/с

Результаты оригинальных расчетов переноса носителей заряда в кремниевом биполярном транзисторе с 90 нм базой показывают [8], что в отсутствие воздействия ионизирующих излучений распределение электронов по скоростям в базовой области соответствует распределению Максвелла. При воздействии потока квантов высоких энергий деформация функции распределения приводит к существенному изменению условий переноса носителей заряда, статических и малосигнальных характеристик биполярного транзистора.

Заключение

В работе предложена аналитическая модель деградации статических и малосигнальных характеристик биполярного транзистора при воздействии дефектообразующих излучений с учетом баллистического предела скорости неосновных носителей заряда в базе на основе граничных условий Хансена [3]. Теоретически показано, что с уменьшением толщины базы относительная деградация статических характеристик транзистора уменьшается, что обуславливает более высокую радиационную стойкость субмикронных структур. Степень деградации модуля коэффициента усиления биполярного транзистора при воздействии дефектообразующих излучений не зависит от рабочей частоты транзистора.

Полученные результаты могут быть использованы при расчетах электрических режимов работы биполярных транзисторов с тонкой базой СВЧ и КВЧ диапазонов в схемах включения с общей базой и общим эмиттером.

Авторы выражают благодарность Н.Ф. Асмоловой за полезные замечания при подготовке работы.

Список литературы

1. Paul D.J. Si/SiGe heterostructures: from material and physics to devices and circuits // *Semicond. Sci. Technol.* 2004. V. 19. P. 75–108.
2. Пузанов А.С., Оболенский С.В. Аналитическая модель переходных ионизационных процессов в кремниевых биполярных транзисторах с тонкой базой при воздействии фотонного импульсного излучения // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру»* (в печати).
3. Hansen O. Diffusion in a short base // *Solid-State Electronics.* 1994. V. 37. № 9. P. 1663–1669.
4. Ладыгин Е.А. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. М.: Советское радио, 1980. 224 с.
5. Трутко А.Ф. Методы расчета транзисторов. М.: Энергия, 1971. 272 с.
6. Pulfrey D.L., St. Denis A.R., Vaidyanathan M. Compact modelling of high-frequency small-dimension bipolar transistors // *IEEE COMMAD98.* 1998. P. 1–5.
7. Vaidyanathan M., Pulfrey D.L. Effects of quasi-ballistic base transport on the high-frequency characteristics of bipolar transistors // *IEEE Transactions on Electron Devices.* 1997. V. ED-44. P. 618–626.
8. Пузанов А.С., Оболенский С.В. Особенности переноса электронов в биполярных транзисторных структурах с тонкой базой при воздействии потока квантов высоких энергий // *Микроэлектроника.* 2012. Т. 41. № 4. С. 304–312.

ANALYTICAL MODEL FOR CHARACTERISTIC DEGRADATION OF SILICON THIN-BASE BIPOLAR TRANSISTORS EXPOSED TO DEFECT-INDUCING RADIATION

V.K. Kiselev, S.V. Obolensky, A.S. Puzanov

An analytical model has been developed to describe degradation of static and small-signal characteristics of thin-base bipolar transistors. The impact of exposure to radiation and the ballistic limit on charge-carrier velocity has been taken into account. It has theoretically been shown that the degradation of the transistor static characteristics decreases with a decrease in the base thickness to less than 100 nm.

Keywords: thin-base bipolar transistor, ballistic transport of charge carriers, defect-inducing radiation.