

Рассматривается методика расчета радиационной стойкости силовых ключей на примере структуры IGBT при воздействии непрерывных или импульсных излучений.

*Ключевые слова:* силовые ключи, радиационная стойкость, методы расчета стойкости.

Структуры силовых ключей различных типов характеризуются высокой степенью однородности и упорядоченности [1], что создает предпосылки для разработки обобщенных методик расчета показателей стойкости при воздействии радиационных факторов. В [2] рассматриваются основы системного анализа стойкости силовых ключей, как условия разработки теоретических моделей для определения количественных показателей стойкости. В настоящей работе рассматривается методика прикладных расчетов.

Предметом исследования является исполнительный элемент силового ключа, который в общем случае функционирует совместно со вспомогательными подсистемами контроля, защиты и управления [1]. Реализация его на силовом биполярном транзисторе (IGBT) или в виде структуры MOSFET- типа [3] обуславливает возможность формирования отказа в виде перехода в кратковременный или постоянный режим замыкания из разомкнутого состояния. Очевидно, что вероятности развития подобных событий зависят от электрических режимов функционирования, структурно- топологических и электрофизических характеристик силового элемента. Определение взаимосвязей между указанными параметрами, обуславливающих смену состояния силового ключа, является целью разработки теоретических моделей.

Представленные в [2] и [3] структура, эквивалентная и логическая схема силового ключа IGBT формируют информационное поле, обеспечивающее возможность оценки соотношений между режимными токами структуры в штатных условиях эксплуатации, а также между режимными и ионизационными токами в критических условиях действия внешних факторов. Это создает предпосылки для формализации условий переключения силового транзистора в составе структуры в проводящее состояние при радиационных воздействиях.

Из эквивалентной схемы рис. 1 [2] для открытого состояния ключа устанавливаются соотношения: - коммутируемый ток

$$I_C = BI_B, \quad (1)$$

где  $B$  - интегральный коэффициент передачи тока базы силового транзистора,  $I_B$  - ток базы открытого транзистора

$$I_B = (U_{CE} - U_{CB}) / (R_{n^-} + R_p), \quad (2)$$

где  $U_{CE}$  - падение напряжения на открытом ключе,  $U_{CB}$  - падение напряжения на эмиттерном переходе силового транзистора (коллекторе силового ключа),  $R_{n^-}$  - сопротивление базовой  $n^-$  области силового транзистора,  $R_p$  - поперечное сопротивление коллекторной области силового транзистора.

Распределенное стационарное сопротивление базы силового транзистора  $R_{n^-}$  определяется по известному выражению

$$R_{n^-} = \rho \frac{d_{n^-}}{S_{n^-}} = \frac{d_{n^-}}{q\mu_n n_n S_{n^-}}, \quad (3)$$

где  $\rho$  - удельное объемное сопротивление материала базовой области,  $d_{n^-}$  - толщина базового слоя силового транзистора,  $S_{n^-}$  - площадь поперечного сечения области базы,  $\mu_n$  - подвижность носителей в области базы,  $q$  - заряд электрона,  $n_n$  - концентрация равновесных основных носителей (электронов) в базовой области.

Зависимость концентрации неравновесных неосновных носителей (дырок) от коллекторного тока силового транзистора учитывается в [4] выражением

$$n_p = \frac{I_C d_{n^-}}{2qBD_p S_{n^-}}, \quad (4)$$

где  $D_p$  - коэффициент диффузии дырок в области базы. Равновесная концентрация основных носителей в базе силового транзистора в составе ключа IGBT – типа определяется концентрацией донорных примесей

$$n_n = \sqrt{2N_c N_d} e^{-\frac{\Delta W_d}{2kT}}, \quad (5)$$

где  $N_c$  - эффективная плотность состояний,  $N_d$  - концентрация донорных примесей,  $\Delta W_d$  - энергия активации донорных примесей,  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - абсолютная температура. С учетом (4) и (5) оценка сопротивления базы открытого силового ключа принимает вид

$$R_{n^-} = d_{n^-} / \left\{ \frac{I_B d_{n^-}}{2\varphi_T} + q\mu_n \sqrt{2N_c N_d} e^{-\frac{\Delta W_d}{2kT}} S_{n^-} \right\}, \quad (6)$$

где  $\varphi_T = kT/q$  - температурный потенциал. Аналогично для коллекторной  $p$  - области силового транзистора определяется величина поперечного сопротивления

$$R_p = d_p / \left\{ \frac{I_C d_p}{2\varphi_T} + q\mu_p \sqrt{2N_v N_a} e^{-\frac{\Delta W_a}{2kT}} S_p \right\}, \quad (7)$$

где  $d_p$  - эквивалентная длина  $p$  - области.

Теоретические модели (2) – (7) позволяют определить зависимость тока базы силового транзистора от электрофизических характеристик и топологических параметров силового ключа

$$I_B = \frac{(U_{CE} - U_{CB})}{\frac{d_{n^-}}{\frac{I_B d_{n^-}}{2\varphi_T} + q\mu_n S_{n^-} \sqrt{2N_c N_d} e^{-\frac{\Delta W_d}{2kT}}} + \frac{d_p}{\frac{I_C}{2\varphi_T} + q\mu_p S_p \sqrt{2N_v N_a} e^{-\frac{\Delta W_a}{2kT}}}}. \quad (8)$$

При заданном значении коммутируемого силовым ключом тока коллектора  $I_C$ , ток базы (8) является характеристическим, обеспечивающим переключение его в открытое состояние. В радиационных условиях оценка (8) определяет суммарное значение ионизационных токов, замыкающихся через цепь базы силового транзистора, обуславливающее переключение прибора в открытое состояние. В [2] показано, что источниками ионизационных токов в *IGBT* являются:

- коллекторный переход  $p^+ - n^-$  силового транзистора в составе ключа;
- коллекторный переход  $n^- - p$  паразитного транзистора, физически интегрированный с границей  $p$  - ячейки в структуре  $n^-$  - базы силового транзистора.

Физические закономерности генерации стационарных ионизационных токов отображаются зависимостью

$$I_i = qgP_\gamma Sd = qGV_E, \quad (9)$$

где  $g$  - скорость генерации носителей, для кремния  $g = 4,3 \cdot 10^{23} \text{ nap} \cdot \Gamma p^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$ ,  $P_\gamma$  - мощность дозы ионизирующего излучения,  $S$  - площадь перехода,  $d$  - эквивалентная толщина слоя собирания носителей,  $V_E$  - эквивалентный объем собирания носителей заряда. Структурно-топологические особенности силовых ключей типа *IGBT* [1] вместе с относительно большими значениями времени жизни и, соответственно, диффузионной длины носителей, позволяют определить эквивалентный объем собирания в виде

$$V_E = (S_{p^+n^-} + S_{n^-p}) d_c = \frac{d_c I_C}{J}, \quad (10)$$

где  $d_c$  - толщина кристалла,  $I_C$  - коммутируемый ток,  $J$  - плотность тока. С учетом (10) ионизационный ток в цепи базы закрытого силового транзистора для кремния определяется соотношением

$$I_i = 6,9 \cdot 10^4 d_c I_C P_\gamma / J. \quad (11)$$

Из (11) следует, что одним из способов повышения стойкости силовых ключей является повышение плотности тока в открытом состоянии ключа.

Из условия равенства (8) и (10) находится мощность дозы ионизирующего излучения, вызывающего включение силового ключа *IGBT*

$$P_{\gamma} = \frac{J}{1,4 \cdot 10^5 d_c I_C} \frac{(U_{CE} - U_{CB})}{\frac{d_{n^-}}{\frac{I_B d_{n^-}}{2\varphi_T} + q\mu_n S_{n^-} \sqrt{2N_c N_d} e^{-\frac{\Delta W_d}{2kT}}} + \frac{d_p}{\frac{I_C d_p}{2\varphi_T} + q\mu_p S_p \sqrt{2N_v N_a} e^{-\frac{\Delta W_a}{2kT}}}}. \quad (12)$$

Преобразование (12) с учетом (10) позволяет оценить влияние топологических параметров на значение показателя радиационной стойкости

$$P_{\gamma} = \frac{1}{6,9 \cdot 10^4 d_c (S_{n^-} + S_p)} \frac{(U_{CE} - U_{CB})}{\frac{d_{n^-}}{\frac{I_B d_{n^-}}{2\varphi_T} + q\mu_n S_{n^-} \sqrt{2N_c N_d} e^{-\frac{\Delta W_d}{2kT}}} + \frac{d_p}{\frac{I_C d_p}{2\varphi_T} + q\mu_p S_p \sqrt{2N_v N_a} e^{-\frac{\Delta W_a}{2kT}}}}. \quad (13)$$

Анализ зависимости (13) показывает значительное влияние режимных и топологических факторов на стойкость рассматриваемых структур к действию ионизирующих излучений. Для силовых приборов характерным является электрический режим с высоким уровнем инжекции, когда концентрация неосновных неравновесных носителей равна или превышает концентрацию основных равновесных носителей. Формально это условие может быть представлено в виде

$$\frac{I_B d_{n^-}}{2\varphi_T} \geq q\mu_n S_{n^-} \sqrt{2N_c N_d} e^{-\frac{\Delta W_d}{2kT}}. \quad (14)$$

Для граничного случая равенства в (14) оценка (13) принимает вид

$$P_{\gamma} = \frac{I_C (U_{CE} - U_{CB})}{6,9 \cdot 10^4 d_c (S_{n^-} + S_p)} (B+1) \varphi_T, \quad (15)$$

Из (15) следуют очевидные закономерности влияния топологических параметров и режимных факторов на показатели стойкости силовых ключей *IGBT* к действию гамма - излучений для типовых электрических режимов.

## Литература

1. **Воронин П.А.** Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Изд. дом «Додэка XXI», 2005.
2. **Устюжанинов В.Н.** Системный анализ и расчет радиационной стойкости силовых полупроводниковых ключей с применением аппарата математической логики // Наст. сб.
3. **Устюжанинов В.Н., Фролова Т.Н.** Задачи теоретического анализа радиационной стойкости элементов силовой электроники на структурах *IGBT* // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2006. Вып. 1 – 2. С. 68 – 75.
4. **Устюжанинов В.Н.** Теоретические модели одиночных эффектов смены состояний в биполярных микроструктурах при действии тяжелых заряженных частиц космического пространства // Наст. сб.