

УДК 621.382
РЕЖИМНАЯ И РАДИАЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ПРЯМОГО ВКЛЮЧЕНИЯ
СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

В.Н.Устюжанинов, Т.Н.Фролова, В.И. Бутин

Исследуются закономерности формирования фронта в силовых полупроводниковых приборах с неоднородной базой. Приведены результаты математического моделирования влияния режимных и радиационных факторов на электрические параметры прямого включения приборов силовой электроники.

Жесткие и противоречивые требования к электрическим параметрам силовых полупроводниковых приборов: высокие уровни рабочих напряжений, токов и мощностей, минимальные длительности переходных состояний при переключениях и др., а также высокие уровни тепловых нагрузок на кристалл и элементы конструкции находят отражение в топологических параметрах и характеристиках полупроводниковых структур. Для диапазонов мощностей от десятков ватт до десятков киловатт разработаны базовые структуры силовых приборов типа *MOS*, *MOSFET*, *SIT*, *BSIT*, *PT IGBT*, *NPT IGBT*, *SITh*, *MCT*, *CSTBT*, силовые биполярные транзисторы и другие структуры, работающие в ключевом режиме [1]. Разнообразие типов силовых приборов отражает тенденцию расширения области применения, диапазона мощностей и требований к электрическим параметрам. Актуальность проблемы обеспечения устойчивой работы и надежного функционирования возрастает по мере увеличения уровней коммутируемых токов и напряжений. Для силовых биполярных структур в составе силовых приборов разных типов режим больших токов соответствует высоким уровням инжекции и сопутствующими негативными эффектами, ухудшающими электрические параметры. Высокие уровни блокируемых напряжений обуславливают необходимость обеспечения заданного уровня пробивного напряжения. Требования к тепловым режимам, обеспечивающим надежность по критерию отсутствия теплового пробоя, реализуются минимизацией остаточного напряжения в открытом состоянии и длительностей переходных процессов переключения.

Многообразие типов силовых приборов и вариантов их структур порождает проблемы оптимизации топологической структуры на основе теоретических моделей по основным критериям, включая требование обеспечения заданного частотного диапазона коммутации высоковольтных цепей. Одним из условий решения подобных задач является выполнение процедур систематизации и классификации топологических структур приборов разных типов с целью определения общих признаков и частных особенностей по электрическим параметрам и топологическим характеристикам. В результате установлены общие топологические признаки высоковольтных приборов разных типов. Наиболее важными из них являются [1]:

- вертикальная структура биполярных и полевых силовых транзисторов;
- относительно большие абсолютные значения толщины базовой области (десятки микрон) биполярных силовых транзисторов в составе высоковольтных ключей и длины вертикальных каналов в составе полевых приборов;
- одинаковая структура и электрофизические характеристики базовых областей биполярных силовых транзисторов в составе приборов *IGBT* типа и вертикальных каналов в составе полевых силовых коммутаторов различных типов. Такие структуры могут быть однородными в виде n^- - области, или неоднородными в виде n^- , n^+ - структуры с буферным n^+ слоем.

Отмеченные особенности позволяют представить обобщенную топологическую модель силовых приборов разных типов в виде структуры с относительно тонким приповерхностным слоем, в котором интегрированы маломощные каскады управления силовой частью, и основного объема, в котором сосредоточены элементы структуры силовых транзисторов, определяющих энергетические и динамические характеристики приборов. Очевидно, что деградиционные явления, вызванные высокими уровнями инжекции или воздействиями радиационных факторов, развиваются, в первую очередь, в толстой базовой области. Для биполярных транзисторов деградация электрических параметров обусловлена эффектами накопления, рекомбинации и рассасывания заряда неосновных носителей в области базы. Для полевых транзисторов изменения электрических параметров обусловлены режимной и радиационной зависимостью времени жизни и подвижности основных носителей, а также характеристик вертикального силового канала. Очевидно, что введение в структуру базовой области или канала буферного n^+ слоя, как вынужденной меры обеспечения высокого рабочего напряжения, повлияет также и на электрические характеристики прибора в открытом состоянии. Это означает, что предметом анализа быстродействия, надежности, электрической прочности и радиационной стойкости силовых приборов разных типов являются процессы в однородных или неоднородных областях с близкими значениями топологических и электрофизических характеристик.

Такой вывод имеет важные практические последствия. Большое разнообразие типов и топологических вариантов структуры силовых приборов можно анализировать в рамках единого методологического подхода на основе уравнений переноса заряда с учетом граничных и начальных

условий, а также характеристик воздействующих факторов. Этому способствует общность топологических характеристик и структурная упорядоченность силовых элементов в приборах разных типов. Методика исследования должна учитывать распределенные параметры и электрофизические характеристики областей топологической структуры кристалла, закономерности диффузионного и дрейфового переноса носителей заряда, внутренние характеристики формирователей импульсов управляющих сигналов в маломощных каскадах управления.

Анализ показывает, что различные варианты распределения концентраций неосновных неравновесных носителей заряда (HH) в базовой области, отражающие специфику режима функционирования и переключения (нормальный активный, нормальный инверсный, включение, выключение, переключение, насыщение, рассасывание и другие режимы) можно адекватно формализовать, используя аппарат и методы решений уравнений математической физики [2]. При этом негативная специфика силовых приборов – плоская слоистая структура базовой области с относительно большой площадью сечения и толщиной, обеспечивает наибольшее приближение к идеализированным моделям, исследуемым в теории электро – и теплопроводности.

Отмеченные особенности означают, что задачи определения электрических параметров силовых приборов в стационарных и переходных состояниях с учетом действия режимных и радиационных факторов образуют подмножество типовых задач математической физики, для которых известны алгоритмы и методы решений. В [3] рассмотрен пример решения подобной задачи для нормального активного режима функционирования силового биполярного транзистора с гомогенной базой и потенциальным управлением базовой цепью. Структура неоднородной базовой области силового прибора [1] содержит область n^+ с высокой концентрацией донорных примесей. Особенности процессов пространственно – временного распределения концентраций HH в неоднородной базе при переключении прибора из нейтрального состояния в режимы различной степени насыщения могут быть установлены в результате решения краевой задачи, включающей уравнение непрерывности

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 P(x,t)}{\partial x^2} - \frac{P(x,t)}{\tau}, \quad (1)$$

где $P(x,t)$ - функция пространственно – временного распределения неосновных неравновесных носителей в базе, D - коэффициент диффузии HH в области базы, $\varphi = kT/q$ - тепловой потенциал, k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, q - заряд электрона, τ - среднее время жизни HH в базовой области транзистора. Применительно к рассматриваемой задаче, уравнение (1) необходимо решать с граничными условиями первого рода, когда формирователь импульсов управляющего сигнала является генератором напряжения,

$$P(0,t) = P_1, \quad P(d,t) = P_3, \quad (2)$$

где P_3 - концентрация HH – дырок на границе базы и коллекторного перехода, $d = d_1 + d_2$ - толщина неоднородной базы, образованной слоями n^- толщиной d_1 и n^+ толщиной d_2 с различными концентрациями примесей. Начальное условие задачи переключения прибора из состояния с $P_1 = 0$ в режим стационарного прямого тока перехода эмиттер – база

$$P(x,0) = 0 \quad (3)$$

для каждого слоя базы.

Решение краевой задачи (1) – (3) для области n^- имеет вид

$$P(x,t) = \frac{P_1 sh \frac{d_1 - x}{\sqrt{D\tau}} + P_2 sh \frac{x}{\sqrt{D\tau}}}{sh \frac{d_1}{\sqrt{D\tau}}} - \frac{2}{d_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n\pi (P_1 - P_2 \cos n\pi)}{d_1 \left(\frac{1}{d_1 \tau} + \frac{n^2 \pi^2}{d_1^2} \right)} \sin \frac{n\pi x}{d_1} e^{-\left(\frac{n^2 \pi^2 D}{d_1^2} + \frac{1}{\tau} \right) t}. \quad (4)$$

Для реальных значений параметров структуры и электрофизических характеристик базовой области уравнение (4) упрощается до вида

$$P(x,t) = P_1 \left(1 - \frac{x}{d_1} \right) + P_2 \left(\frac{x}{d_1} \right) - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi x}{d_1}}{n} [P_1 - P_2 \cos n\pi] e^{-\left(\frac{L_1}{d_1} \right)^2 n^2 \pi^2 \frac{t}{\tau}}, \quad (5)$$

где P_2 - концентрация HH на границе n^- и n^+ областей, L_1 - диффузионная длина HH в n^- области базы. Аналогичный вид имеет решение для n^+ области базы

$$P(x,t) = P_2 \left(1 - \frac{x}{d_2}\right) + P_3 \left(\frac{x}{d_2}\right) - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi x}{d_2}}{n} [P_2 - P_3 \cos n\pi] e^{-\left(\frac{L_2}{d_2}\right)^2 n^2 \pi^2 \frac{t}{\tau}}. \quad (6)$$

Распределения (5) и (6) позволяют определить плотности токов, втекающих в область n^- со стороны открытого эмиттерного перехода и в область n^+ через границу раздела областей с концентрацией HH P_2 . Из (5) следует

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial x} = -\frac{P_1}{d_1} + \frac{P_2}{d_1} - \frac{2}{d_1} \sum_{n=1}^{\infty} \cos \frac{n\pi x}{d_1} [P_1 - P_2 \cos n\pi] e^{-\left(\frac{L_1}{d_1}\right)^2 n^2 \pi^2 \frac{t}{\tau}}. \quad (7)$$

Из (7) находится граничное значение градиента концентрации HH

$$\frac{\partial P(0,t)}{\partial x} = -\frac{P_1}{d_1} + \frac{P_2}{d_1} - \frac{2}{d_1} \sum_{n=1}^{\infty} (P_1 - P_2 \cos n\pi) e^{-\left(\frac{L_1}{d_1}\right)^2 n^2 \pi^2 \frac{t}{\tau}}. \quad (8)$$

Быстрая сходимость ряда (8) в области малых времен позволяет удерживать два члена ряда. В результате оценка (8) принимает вид

$$\frac{\partial P(0,t)}{\partial x} = -\frac{P_1 - P_2}{d_1} - \frac{2(P_1 + P_2)}{d_1} e^{-\left(\frac{L_1}{d_1}\right)^2 \pi^2 \frac{t}{\tau}} - \frac{(P_1 - P_2)}{d_1} e^{-\left(\frac{L_1}{d_1}\right)^2 4\pi^2 \frac{t}{\tau}}. \quad (9)$$

Из (9) находится стационарное значение плотности тока на границе эмиттерного перехода

$$J_1 = -qD \frac{\partial P(0,\infty)}{\partial x} = \frac{qD}{d_1} (P_1 - P_2). \quad (10)$$

Расчеты по (7) показывают, что вследствие равенства градиентов на границах n^- - слоя

$$\frac{\partial P(0,t)}{\partial x} = \frac{\partial P(d_1,t)}{\partial x},$$

обеспечивается равенство плотностей токов $J_1 = J_2$ на границах этого слоя.

Анализ временных характеристик установления стационарных распределений (6) в n^- - области показывает, что быстрая сходимость ряда позволяет учитывать только первый член разложения. Тогда длительность времени t_1 достижения стационарного распределения концентраций HH может быть определена из условия

$$P(x,t_1) = 0,95P(x,\infty). \quad (11)$$

С учетом функции пространственно – временного распределения (5) и условия (11) для точки экстремума с координатой $x = d/2$ находится длительность времени установления стационарного распределения HH в n^- - области при включении силового прибора

$$t_1 = 0,33 \left(\frac{d_1}{L_1}\right)^2 \tau_1 = 0,33 \frac{d_1^2}{D_1}, \quad (12)$$

где τ_1 - среднее время жизни HH в n^- - области, D_1 - коэффициент диффузии неравновесных носителей в n^- - области. Из (12) следует, что основным фактором, определяющим, при прочих равных условиях, длительность времени нарастания импульса прямого тока в силовых приборах, является коэффициент диффузии. Поэтому приборы с дырочным типом неосновных носителей в базовой области характеризуются меньшим, примерно в b раз, значением быстродействия по длительности фронта импульса тока. Многофакторную режимную зависимость коэффициента диффузии при высоких уровнях инжекции принято учитывать интегральной оценкой в виде удвоения справочного значения этого коэффициента. Оценка (12) распространяется также и на n^+ - область неоднородной базы

$$t_2 = 0,33 \frac{d_2^2}{D_2}. \quad (13)$$

При условии $d_1 > d_2$ можно из (12) и (13) следует оценка

$$t_{12} = 0,33 \frac{(d_1 + d_2)^2}{D_1}. \quad (14)$$

Введение n^+ - области в структуру силовых приборов разных типов производится с основной целью обеспечения высокого рабочего напряжения. Для оценки влияния этого слоя на величину остаточного напряжения в открытом состоянии достаточно учесть условие равенства градиентов концентраций в неоднородной базовой области, вытекающее из решений (5) и (6) краевой задачи. В результате, остаточное напряжение

$$U_0 = U_{pn} + IR_{d1} + IR_{d2},$$

где U_{pn} - падение напряжения на прямосмещенном эмиттерном переходе, R_{d1} и R_{d2} сопротивления n^- и n^+ - областей базы в режиме стационарного прямого тока. В общем случае остаточное напряжение определяется зависимостью

$$U_0 = U_{pn} + \frac{D_1(P_1 - P_2)}{\mu_h \left(bn^- + \frac{P_1 - P_2}{2} \right)} \left[1 + \frac{d_2}{d_1} \frac{bn^- + \frac{P_1 - P_2}{2}}{bn^+ + \frac{P_2 - P_3}{2}} \right], \quad (13)$$

где $b = \mu_e / \mu_h$ - отношение подвижностей электронов и дырок. Для кремния $b = 2,6$. С учетом равенства градиентов концентраций

$$\frac{P_1 - P_2}{d_1} = \frac{P_2 - P_3}{d_2},$$

уравнение (13) принимает вид

$$U_0 = U_{pn} + \frac{D_1(P_1 - P_2)}{\mu_h \left(bn^- + \frac{P_1 - P_2}{2} \right)} \left[1 + \frac{d_2}{d_1} \frac{bn^- + \frac{P_1 - P_2}{2}}{bn^+ + \frac{d_2}{d_1} \frac{P_1 - P_2}{2}} \right]. \quad (14)$$

Уравнение (14) определяет влияние параметров буферного n^+ - слоя на величину падения напряжения на распределенном сопротивлении базы открытого силового прибора. Из (14) следует, что остаточное напряжение зависит от уровня инжекции, определяемого соотношением неравновесных концентраций неосновных носителей и равновесных концентраций основных носителей в области базы. Для уровня инжекции, определяемого соотношением

$$bn^- = (P_1 - P_2)/2, \quad (15)$$

оценка (14) принимает вид

$$U_0 = U_{pn} + \frac{D_1}{\mu_h} \left[1 + \frac{2}{1 + \frac{n^+}{n^-} \frac{d_1}{d_2}} \right] = U_{pn} + \frac{D_1}{\mu_h} \left(1 + 2 \frac{n^-}{n^+} \frac{d_2}{d_1} \right). \quad (16)$$

Оценка (16) показывает, что даже при относительно высоком уровне инжекции (15) реальным значениям концентраций и размеров областей базы соответствует пренебрежимо малое приращение падения напряжения на буферном слое n^+ в открытом состоянии прибора. При увеличении уровня инжекции до значения

$$bn^- = P_1 - P_2 \quad (17)$$

остаточное падение напряжения на неоднородной базе уменьшается до уровня

$$U_0 = U_{pn} + \frac{D_1}{\mu_h} \left(\frac{2}{3} + \frac{n^-}{n^+} \frac{d_2}{d_1} \right). \quad (18)$$

Анализ оценок (16) и (18) показывает, что введение в базу силового транзистора буферного n^+ - слоя приводит к снижению остаточного напряжения по мере повышения уровня инжекции.

Зависимости (14) – (18) распространяются на режим насыщения, когда $P_2 > 0$, а также на нормальный активный режим функционирования силового прибора, когда выполняется граничное

условие $P_2 = 0$. Во всех указанных режимах в расчетных соотношениях присутствует масштабирующий множитель D/μ , который, в соответствии с формулой Эйнштейна $D = \varphi_T \mu$, равен тепловому потенциалу $\varphi_T = kT/q$. Это означает, что при высоких уровнях инжекции падение напряжения на неоднородной базовой области силового прибора пренебрежимо мало и не зависит от эффектов корпускулярного облучения. В этих условиях радиационнонезависимым параметром, определяющим величину остаточного напряжения открытого силового ключа в условиях радиационных воздействий, является падение напряжения U_{pn} на прямосмещенном эмиттерном переходе. Радиационная зависимость этого параметра рассмотрена в [3].

Литература

1. *Воронин П.А.* Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Издательский дом Додэка-XXI, 2005.- 384 с.
2. *Тихонов А.Н, Самарский А.А.* Уравнения математической физики. – М, «Наука», 1972 г.
3. *Устюжанинов В.Н.* Характеристики силовых биполярных транзисторов в полях ионизирующих излучений // наст. сб.

ВАНТ, Вып.1 -2, 2009 г.