

ЗАХИРИДДИН
МУҲАММАД БОБУР
НОМИДАГИ АНДИЖОН
ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ANDIJAN STATE
UNIVERSITY NAMED
AFTER ZAKHIRIDDIN
MUKHAMMAD BABUR

ИЛМИЙ ХАБАРНОМА

Физика-математика
Тадқиқотлари
(Махсус сон)

SCIENTIFIC BULLETIN

Physical and
Mathematical Research
(Special Issue)

Андижон
2023 йил

Муассис

Захириддин Мухаммад Бобур номидаги Андижон давлат университети

**ИЛМИЙ ХАБАРНОМА.
ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА
ТАДҚИҚОТЛАРИ**

Журнал бир йилда 2 марта чоп этилади.

Андижон вилояти ахборот ва оммавий коммуникациялар бошқармаси
томонидан 2019-йил 26 декабрда
0452 рақам билан рўйхатга олинган.

Нашр индекси: 344

Нашр учун масъул:
А.Й.Бобоев

Босишга рухсат этилди:
27.12.2019.

Қоғоз бичими: 60x81 1/8

Босма табоғи: 13,5

Офсет босма. Офсет қоғози.

Адади: 110 дона.

Баҳоси келишилган нарҳда.

Буюртъа №: 165.

“Мухаррир” нашриёти манбаа бўлимида чоп этилди.
Тошкент шаҳри, Сўгалли ота кўчаси 7-уй

Таҳририят манзили:

170100, Андижон шаҳри, Университет кўчаси, 129. Телефон: +998911602043.

Факс: (374) 223-88-30

E-mail: adu_xabarnoma@mail.ru Расмий сайт: uzjournals.edu.uz/adu

**Сборник статей международной научно-практической конференции по
«Полупроводниковая опто- и наноэлектроника, альтернативные
источники энергии и их перспективы» Андижан, 12-13 октября 2023 года**

ОГЛАВЛЕНИЕ

С.З. ЗАЙНАБИДИНОВ, А.Й. БОБОЕВ, Б.М. ЭРГАШЕВ Механизмы формирования квантово-размерных нанообъектов в многокомпонентных структурах GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe.....	7
М.Х. АШУРОВ, Б.Л. ОКСЕНГЕНДЛЕР, С.Х. СУЛЕЙМАНОВ, С.Е. МАКСИМОВ, З.И. КАРИМОВ, Н.Н. НИКИФОРОВА, Ф.А. ИСКАНДАРОВА Современные аспекты радиационной деградации твердых тел и биообъектов.....	10
М.Т. НОРМУРАДОВ, Е.Н. ВЛАСОВА, К.Т. ДОВРАНОВ, Д.А. НОРМУРОДОВ, Х.Т. ДАВРАНОВ Измерение оптических параметров, диэлектрических материалов, созданных низкоэнергетическим ионно-плазменным методом.....	15
Е.С. РЕМБЕЗА, Т.В. СВИСТОВА, Н.Н. КОШЕЛЕВА, М.Б. РАСУЛОВА Гетероструктуры металлооксид-кремний, как перспективные структуры для создания солнечных элементов.....	24
О.О. МАМАТКАРИМОВ, В.Х. QUHQAROV, М.А. ERGASHEV, А.А. XOLMIRZAYEV Yarimo'tkazgich moddalariga asoslangan konvertorlarni ishlab chiqishda va uning asl parametrlarini saqlanishini o'rganish xossalari.....	28
S.Z. ZAINABIDINOV, H.J. MANSUROV, N.YU. YUNUSALIEV Photoelectric Properties of n-ZnO/p-Si Heterostructures.....	34
Х.Б. АШУРОВ, А.А. ЗАРИПОВ, А.А. РАХИМОВ, У.Ф. БЕРИДЕВ, И.Ж. АБДИСАИДОВ, М.М. АДИЛОВ Методы синтеза никелевого нанокатализатора для получения углеродных нанотрубок.....	39
Н.Ф. ЗИКРИЛЛАЕВ, М.М. ШОАБДУРАХИМОВА Особенности автоколебаний тока в компенсированном кремнии и их применение в электронике.....	46
Ш.Б. УТАМУРАДОВА, Ж.Ж. ХАМДАМОВ, В.Ф. ГРЕМЕНОК, К.А. ИСМАЙЛОВ, Х.Ж. МАТЧОНОВ, Х.Ю. УТЕМУРАТОВА Комбинационное рассеяние света в монокристаллическом Si, легированного атомами Gd.....	54
N.N. ABDURAZAKOV, R. ALIEV Power load forecasting using linear regression method of machine learning: Andijan regional case.....	58
И. Н. КАРИМОВ, М. ФОЗИЛЖОНОВ, А.Э. АБДИКАРИМОВ Вольт-фарадные характеристики SOI FINFET структуры.....	63
О.А. АБДУЛХАЕВ, А.З. РАХМАТОВ Низковольтные ограничители напряжения на основе структур с эффектом смыкания.....	67
SH.X. YO'LCHIYEV, B.D. G'ULOMOV, J.A. O'RINBOYEV ZnO va ZnO:Al yuqqa plyonkalarini sintez qilish va ularni fizik xossalari o'rganish.....	75
Ш.Т. ХОЖИЕВ, С.Ф. КОВАЛЕНКО, С.Е. МАКСИМОВ, В.М. РОТШТЕЙН, О.Ф. ТУКФАТУЛЛИН, Б.Л. ОКСЕНГЕНДЛЕР, Ш.К. КУЧКАНОВ Кластеры Y_n^+ и $Y_nO_m^+$, распыленные ионной бомбардировкой: эксперимент и теоретические аспекты.....	79

M. RASULOVA	
Application of Solution of the Quantum Kinetic Equations for Renewable Energy problem.....	85
A.A.МИРЗААЛИМОВ, Р.АЛИЕВ, Н.А.МИРЗААЛИМОВ	
разработка высокоэффективных и ресурсосберегающих конструкций кремниевых высоковольтных фотоэлектрических устройств.....	89
D.G' KHAJIBAEV, B.Ya. YAVIDOV	
On correlation of T_c and Cu-O _{apex} distance in single layered cuprates.....	97
A. АБДУЛВАХИДОВ, С.ОТАЖОНОВ, Р.ЭРГАШЕВ	
Фоточувствительность солнечных элементов гетероструктуры p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe с глубокими примесными уровнями.....	102
М.К. КУРБАНОВ, К.У. ОТАБАЕВА, Д.У. ХУДОЙНАЗАРОВА	
Распыление пленок льда при бомбардировке ионами Ag+.....	107
H.O. QO'CHQAROV S.B. FAZLIDDINOV B.B.BURXONJANOV	
Simmetrik bo'lgan silikon diodning statik parametrlarini hisoblash p-n-uch nuqtali zaryadlangan nuqsonlarning δ -qatlami o'tish.....	113
N.Yu. SHARIBAYEV, B.M. BAXROMOV R.M. JALALOV A.A. YUSUFJONOV	
Study of electrophysical properties of semiconductor materials based on lead-selenium.....	120
Ш.К.КУЧКАНОВ, Х.Б.АШУРОВ, Б.М.АБДУРАХМАНОВ, С.Е.МАКСИМОВ, О. Э. КИМИЗБАЕВА, Ш.А.МАХМУДОВ	
О роли структурных дефектов в процессах генерации при нагреве эдс и носителей заряда в эпитаксиальных плёночных кремниевых p-n-структурах.....	125
S.Z. ZAYNABIDINOV, I.M. SOLIYEV, SH.K. AKBAROV	
Kremniy monokristallarida elektro noaktiv nikel va kislorod atomlarining o'zaro tasirlashuvi.	128
M.A.MUYDINOVA, G.J. MAMATOVA	
Yarimo'tkazgich plastinalar sirti va p-n strukturalarning optik xususiyatlari va ularni takomillashtirish usullari.....	132
L.O.OLIMOV, I.I. ANARBOYEV	
Kremniy granulari asosida termoelektrik material samaradorligini oshirish mexanizimi.....	136

Низковольтные ограничители напряжения на основе структур с эффектом смыкания

О.А. Абдулхаев¹, А.З. Рахматов²

¹Физико-технический институт Академии наук Республики Узбекистан

²JSC "FOTON", Tashkent, Uzbekistan

Аннотация. Данная работа посвящена аналитическому исследованию механизмов формирования предпробойных токовых характеристик низковольтных ограничителей напряжения на основе полупроводниковых структур с эффектом смыкания. Рассмотрена проблема тонкой базы и вопросы применимости диффузионно-дрейфовой модели в структурах с эффектом смыкания, изучены процессы токопереноса и определены предпробойные токи утечки в p^+-n-p^+ -структурах и $m-n-m$ -структурах с эффектом смыкания, расчетные данные сравнены с результатами экспериментов.

Ключевые слова: ограничитель напряжения, эффект смыкания, пробой, тонкая база, токоперенос, токи утечки, кремний.

1. Введение. Ограничители напряжения являются незаменимыми элементами для обеспечения надежной работы и длительного срока службы электронных устройств. Известно, что 50-60% неисправностей в электронных устройствах обусловлены, именно, электрическими перегрузками [1,2]. В традиционных коммерческих ограничителях при переходе из высоковольтных ограничителей к низковольтным наблюдается существенное ухудшение их параметров: ток утечки, электрическая емкость и дифференциальное сопротивление в пробойной области повышаются на несколько порядков, а температурный коэффициент напряжения пробоя меняет свой знак на отрицательный, что в совокупности приводит к снижению энергоэффективности и надежности системы защиты электротехнических устройств, питаемых от низковольтных источников [3]. Наблюдаемые ухудшения параметров традиционных ограничителей напряжения при понижении напряжения ограничения можно объяснить тем, что снижение напряжения лавинного пробоя требует увеличения степени легирования базовой области, что приводит к сужению толщины области объемного заряда и доминированию туннельных токов (с участием глубоких примесных центров) над генерационными токами [4-6]. Проведенные температурные исследования также подтверждают доминирование туннельных токов в предпробойном участке вольтамперной характеристики этих структур [7,8].

В работе [9] показано, что получение перехода эпитаксиальной технологией позволяет значительно уменьшить токи утечки и дифференциальное сопротивление структуры в пробойной области по сравнению с ограничителями напряжения, в которых переход сформирован диффузионной технологией. Однако, даже и в этих ограничителях напряжения с уменьшением напряжения ограничения токи утечки имеют тенденцию к существенному увеличению [10, 11].

В последние годы было показано превосходство ограничителей напряжения на основе структур с эффектом смыкания над традиционно применяемыми аналогами в условиях низкого напряжения питания [12-18]. В частности, впервые возможность применения структур с эффектом смыкания в качестве ограничителей напряжения было показано в работе [19], авторами которой было показано превосходство структур с эффектом смыкания от структур, основанных на лавинном пробое по выдерживаемой мощности при равных относительных размерах структур. В работах [20,21] отмечено другое превосходство структур с эффектом смыкания относительно лавинных структур: высокая термостабильность. Однако, несмотря на большие выдерживаемые мощности и

высокую термостабильность структуры на основе эффекта смыкания из-за сравнительно высокого значения динамического сопротивления в пробойной области оказались не конкурентоспособными в высоковольтной области ограничения.

В работах [11, 21, 23] показано возможность снижения дифференциального сопротивления в пробойной области оптимальным выбором материальных и геометрических параметров, предложенной двухбазовой четырехслойной структуры. В данной работе оптимизация параметров осуществлена методом численной симуляции. Однако сравнение данных, полученных симуляцией с экспериментальными, показывает, что данные симуляции являются заниженными. Авторы работ [12, 13] с целью исключения области с отрицательным динамическим сопротивлением предложили ряд новых конструкций четырех и пятислойных структур, которые приводят к нецелесообразному усложнению технологии производства и соответственно удорожанию себестоимости ограничителя напряжения.

Кроме того, в экспериментально исследованных структурах с эффектом смыкания наблюдается резкий рост токов утечки в предпробойной области, которые не могут быть объяснены в рамках имеющегося в литературе аналитических подходов. Поэтому, в настоящей работе основное внимание уделено на изучение процессов токопереноса в структурах с эффектом смыкания в предпробойной области.

2. Материалы и методы. В данном разделе рассмотрим одномерную задачу при следующих допущениях: приближения Больцмана, то есть концентрации носителей заряда определяются распределением Больцмана и для них справедливо обычное соотношение Эйнштейна. Кроме того, воспользуемся приближением малых электрических полей, то есть пренебрежем процессами насыщения дрейфовой скорости носителей и процессами ударной ионизации, которые, однако, впоследствии могут быть добавлены к рассматриваемой модели. Рассмотрим структуру типа p^+-n-p^+ с произвольным профилем легирования базовой области. Структура состоит из двух гомопереходов p^+-n и $n-p^+$ типа соединенных последовательно-встречно друг другу, то есть при приложении внешнего напряжения переходы смещаются в противоположных направлениях. Таким образом, в обеих полярностях один из переходов является прямосмещенным, а другой обратно смещенным. Для определенности далее будем рассматривать случай, когда переход 1 прямосмещен, а переход 2 обратно смещен. В аналогии с биполярным транзистором прямосмещенный переход будем называть эмиттерным, а обратносмещенный переход соответственно коллекторным.

Как известно, плотность дырочного тока пропорциональна градиенту квазиуровня Ферми для дырок

$$j_p = -q\mu_p \cdot p(x) \cdot \frac{d\varphi_p(x)}{dx}. \quad (1)$$

Где концентрация дырок определяется положением квазиуровня Ферми, согласно соотношению:

$$p(x) = n_i \exp\left(\frac{q}{kT}(\varphi_p(x) - \psi(x))\right). \quad (2)$$

Отсюда подставляя соотношение (2) на формулу плотности тока (1) получим

$$j_p = -q\mu_p \cdot n_i \exp\left(\frac{q}{kT}(\varphi_p(x) - \psi(x))\right) \cdot \frac{d\varphi_p(x)}{dx}. \quad (3)$$

$$-\frac{j_p}{q\mu_p \cdot n_i} \exp\left(\frac{q\psi(x)}{kT}\right) dx = \exp\left(\frac{q\varphi_p(x)}{kT}\right) \cdot d\varphi_p(x). \quad (4)$$

Интегрирование обеих сторон уравнения от $-x_e$ до x_k и учитывая соотношение Эйнштейна ($qD_p = kT\mu_p$) получим

$$-\frac{j_p}{qD_p n_i} \int_{-x_e}^{x_k} \exp\left(\frac{q\psi(x)}{kT}\right) dx = \exp\left(\frac{q\varphi_p(x_k)}{kT}\right) - \exp\left(\frac{q\varphi_p(-x_e)}{kT}\right). \quad (5)$$

С учетом того, что $\psi(-x_e) = 0$ из (2) можем найти $\varphi_p(-x_e)$:

$$\varphi_p(-x_e) = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A(-x_e)}{n_i}. \quad (6)$$

При этом по определению

$$V_{ke} = \varphi_p(-x_e) - \varphi_p(x_k) \quad (7)$$

$$\varphi_p(x_k) = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A(-x_e)}{n_i} - V_{ke}. \quad (8)$$

Таким образом, подставляя (6) и (8) в уравнение (5) находим

$$j_p = \frac{qD_p N_A(-x_e) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{qV_{ke}}{kT}\right) \right\}}{\int_{-x_e}^{x_k} \exp\left(\frac{q\psi(x)}{kT}\right) dx}. \quad (9)$$

Контактная разность потенциалов эмиттерного перехода описывается следующей формулой

$$V_{k1} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A(-x_e) \cdot N_D(x_{b1})}{n_i^2}. \quad (10)$$

Учитывая (10) выражение (9) преобразуется к следующему виду

$$j_p = \frac{qD_p n_i^2 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{qV_{ke}}{kT}\right) \right\}}{N_D(x_{b1}) \int_{-x_e}^{x_k} \exp\left(\frac{q(\psi(x) - V_{k1})}{kT}\right) dx}. \quad (11)$$

Данное уравнение является основным уравнением, определяющим вольтамперную характеристику двухбарьерных структур с эффектом смыкания с произвольным профилем легирования базовой области. В уравнении распределение потенциала $\psi(x)$ определяется из уравнения Пуассона с учетом заданного профиля легирования базовой области $N(x)$.

В качестве примера рассмотрим возможность применения данного уравнения для описания процессов токопереноса в предпробойной области $p^+ - n - p^+$ -структур с однородно легированными областями.

Для этого сначала нужно определить из уравнения Пуассона распределение потенциала $\psi(x)$ по всей длине структуры. Однако учитывая высокую степень легирования эмиттерной и коллекторной областей, можем пренебречь падением потенциала в этих областях, и, следовательно, можем ограничиться рассмотрением распределения потенциала $\psi(x)$ по всей длине базовой области от 0 до x_δ . Решением уравнения Пуассона получим:

$$V(x) = -\frac{V_{k1} - V_{be}}{x_{b1}^2} [x - x_{b1}]^2 - (V_{k1} - V_{be}) \quad \text{при} \quad 0 \leq x \leq x_{b1} \quad (12)$$

$$V(x) = V_{k1} - V_{be} \quad \text{при} \quad x_{b1} \leq x \leq x_{b2} \quad (13)$$

$$V(x) = -\frac{V_{k1} - V_{be} + V_{ke}}{(x_b - x_{b2})^2} [x - x_{b2}]^2 - (V_{k1} - V_{be}) \quad \text{при} \quad x_{b2} \leq x \leq x_b \quad (14)$$

Таким образом, для определения предпробойных токов рассматриваемой структуры необходимо определить значение интеграла находящейся в знаменателе уравнения (11) для распределения потенциала, описываемого согласно (12-14) и в результате чего получим

$$\int_0^{x_b} \exp\left(\frac{q(\psi(x) - V_{k1})}{kT}\right) dx = (\sqrt{2\pi} L_D + W_B) \cdot \exp\left(-\frac{qV_{be}}{kT}\right) \quad (15)$$

Учитывая (15) уравнение вольтамперной характеристики для рассматриваемой структуры будет описываться следующей формулой:

$$j_p = \frac{qD_p n_i^2}{N_D (\sqrt{2\pi} L_D + W_B)} \cdot \exp\left(\frac{qV_{be}}{kT}\right) \cdot \left\{1 - \exp\left(-\frac{qV_{ke}}{kT}\right)\right\}. \quad (16)$$

Таким образом, для описания вольтамперной характеристики рассматриваемой структуры необходимо определить зависимость напряжения падающего на прямосмещаемом эмиттерном переходе от общего напряжения приложенного к структуре, которую можно определить из того факта, что для установления равновесия в рассматриваемой структуре необходимо уравнивание рекомбинационного тока эмиттерного перехода с генерационным током коллекторного перехода:

$$j_1 + j_2 + j_3 = j_4 + j_5 + j_6, \quad (17)$$

где:

$$j_1 = \frac{qD_n n_{pk}}{L_n} \left\{1 - \exp\left(-\frac{qV_{kb}}{kT}\right)\right\} = j_{10} \cdot \left\{1 - \exp\left(-\frac{qV_{kb}}{kT}\right)\right\} \quad (18)$$

$$j_2 = \frac{qn_i \cdot W_{kb}}{\tau_0} \left\{1 - \exp\left(-\frac{qV_{kb}}{2kT}\right)\right\} = j_{20} \cdot \left\{1 - \exp\left(-\frac{qV_{kb}}{2kT}\right)\right\} \quad (19)$$

$$j_3 = \frac{qD_p p_{nb}}{L_p} \left(\coth \frac{W_B}{L_p} - \operatorname{csch} \frac{W_B}{L_p} \right) \left\{1 - \exp\left(-\frac{qV_{kb}}{kT}\right)\right\} = j_0 \cdot \left\{1 - \exp\left(-\frac{qV_{kb}}{kT}\right)\right\} \quad (20)$$

$$j_4 = \frac{qD_n n_{pe}}{L_n} \left\{ \exp\left(\frac{qV_{eb}}{kT}\right) - 1 \right\} = j_{40} \cdot \left\{ \exp\left(\frac{qV_{eb}}{kT}\right) - 1 \right\} \quad (21)$$

$$j_5 = \frac{qn_i \cdot W_{eb}}{2\tau_0} \left\{ \exp\left(\frac{qV_{eb}}{2kT}\right) - 1 \right\} = j_{50} \cdot \left\{ \exp\left(\frac{qV_{eb}}{2kT}\right) - 1 \right\} \quad (22)$$

$$j_6 = \frac{qD_p p_{nb}}{L_p} \left(\coth \frac{W_B}{L_p} - \operatorname{csch} \frac{W_B}{L_p} \right) \left\{ \exp\left(\frac{qV_{eb}}{kT}\right) - 1 \right\} = j_0 \cdot \left\{ \exp\left(\frac{qV_{eb}}{kT}\right) - 1 \right\} \quad (23)$$

Вводя обозначения $x = \exp\left(\frac{qV_{eb}}{2kT}\right) - 1$ и $y = 1 - \exp\left(-\frac{qV_{kb}}{kT}\right)$, уравнение (17)

преобразуется к следующему виду

$$j_{10}y + j_{20}y + j_0y = j_{40}x + j_{50}x + j_0x. \quad (24)$$

Из этого уравнения можно определить падение напряжения на переходе эмиттер-база:

$$V_{eb} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \left\{ P + 1 - P \cdot \exp\left(-\frac{qV_{kb}}{kT}\right) \right\}, \quad (25)$$

$$\text{где} \quad P \equiv \frac{x}{y} = \frac{j_{10} + j_{20} + j_0}{j_{40} + j_{50} + j_0}. \quad (26)$$

Таким образом, для напряжений несколько раз больших, чем kT/q , получим

$$V_{eb} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \{P + 1\} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \left\{ \frac{j_{10} + j_{20} + j_0}{j_{40} + j_{50} + j_0} + 1 \right\}. \quad (27)$$

В транзисторных структурах преобладающим транспортным процессом является процесс, связанный с генерацией и рекомбинацией дырок в базовой области, то есть в выражении (27) по сравнению с членом j_0 другими токами насыщения можно пренебрегать,

$$V_{eb} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \left\{ \frac{j_0}{j_0} + 1 \right\} = \frac{kT}{q} \cdot \ln 2 = 0.018B, \quad (28)$$

что приводит к независимости падения напряжения на переходе эмиттер-база от приложенного к структуре внешнего напряжения. Поэтому в большинстве исследований пренебрегают этим напряжением.

Однако, в рассматриваемых нами структурах в предпробойном участке вольтамперной характеристики с уменьшением длины базы ток j_0 стремиться к нулю, следовательно, в выражении (27) им можно пренебречь

$$V_{eb} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \left\{ \frac{j_{10} + j_{20}}{j_{40} + j_{50}} + 1 \right\}. \quad (29)$$

Подставив ее на уравнение (16) находим:

$$j_p = \frac{qD_p n_i^2}{N_D (\sqrt{2\pi L_D} + W_B)} \cdot \left\{ \frac{j_{10} + j_{20}}{j_{40} + j_{50}} + 1 \right\} \cdot \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{qV_{ke}}{kT} \right) \right\} \quad (30)$$

Учитывая, что в кремниевых структурах генерационные процессы превалируют над диффузионными, то есть $j_{20} \gg j_{10}$, а также $j_{40} \gg j_{50}$, для дырочного тока структуры получим

$$j_p = \frac{qD_p n_i^2}{N_D (\sqrt{2\pi L_D} + W_B)} \cdot \left\{ \frac{j_{20}}{j_{40}} + 1 \right\} \cdot \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{qV_{ke}}{kT} \right) \right\} \quad (31)$$

Таким образом,

$$j_p = \frac{qD_p n_i^2}{N_D (\sqrt{2\pi L_D} + W_B)} \cdot \left\{ \frac{\frac{qn_i W_{kb}}{\tau_0}}{\frac{qD_n n_i^2}{L_n N_{A1}}} + 1 \right\} \cdot \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{qV_{ke}}{kT} \right) \right\} \quad (32)$$

где $W_{kb} = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{qN_D} (V_{k2} + V_{kb})}$ - толщина области объемного заряда коллекторного перехода, $W_b = L - W_{be} - W_{kb}$.

$$j_p = \frac{qn_i}{\tau_0} \frac{D_p}{D_n} \frac{N_{A1}}{N_D} \frac{L_n \cdot W_{kb}}{(\sqrt{2\pi L_D} + L - W_{be} - W_{kb})} \cdot \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{qV_{ke}}{kT} \right) \right\} \quad (33)$$

Таким образом, полученное уравнение (33) определяет процессы формирования вольт амперной характеристики p^+-n-p^+ -структуры с эффектом смыкания в предпробойной области, из которого следует, что для уменьшения токов утечки в предпробойной области вольтамперной характеристики структур с эффектом смыкания следует или увеличивать уровень легирования базовой области (концентрацию доноров N_D) или уменьшит степень легирования эмиттерной области (концентрацию доноров N_A). Также из (33) следует, что значительное увеличение токов утечки у пробойного участка обусловлены увеличением падения напряжения на прямосмещенном переходе, то есть эмиттерном переходе вследствие значительного роста коллекторного тока с увеличением прилаемого напряжения. Чтобы исключить эту область значительного роста токов утечки необходимо увеличит рекомбинационные токи у эмиттерного перехода.

Аналогично выше проведенным расчетам можно получить уравнение вольтамперной характеристики и для структур типа $m-n-m$:

$$j_p = \frac{qD_p n_i^2}{N_D (\sqrt{2\pi} L_D + W_B)} \cdot \left\{ \frac{\frac{qn_i}{\tau_0} \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{qN_D} (V_{K1} + V_{kb})}}{\frac{q^2 D_n N_D}{kT} \exp\left(-\frac{q\varphi_{Bn}}{kT}\right) \sqrt{\frac{2qN_D}{\varepsilon\varepsilon_0} (V_{K2} - V_{be})}} + 1 \right\} \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{qV_{ke}}{kT}\right) \right\} \quad (34)$$

Следует отметить, что полученное выражение (34) определяет процессы формирования вольт амперной характеристики m-n-m-структуры с эффектом смыкания в предпробойной области, из которого следует, что для уменьшения токов утечки в предпробойной области вольтамперной характеристики структур с эффектом смыкания следует или увеличивать уровень легирования базовой области (ток утечки обратно пропорционален концентрации доноров в базовой области в третьей степени) или уменьшит высоту барьера с эмиттерной области.

3. Результаты и обсуждение. На рис.1 представлены результаты сравнения, полученных на основе выражения (34) расчетных данных при значениях переменных, приведенных в работе [24]. Как видно полученное выражение очень хорошо описывает процесс токопереноса в рассматриваемой структуре, что подтверждает согласие расчетных данных с экспериментальными данными.

Таким образом, резкое увеличение токов утечки в предпробойной области вольтамперной характеристики структур с эффектом смыкания определяется процессами перераспределения потенциала между переходами структуры в направлении повышения напряжения прямого смещенного перехода эмиттер-база. Следовательно, для снижения токов утечки в предпробойной области следует подавить процессы перераспределения потенциала, что можно достичь увеличением рекомбинационных токов основных носителей у эмиттерного перехода снижением степени легирования эмиттерной области или уменьшением толщины квазинейтральной области эмиттера.

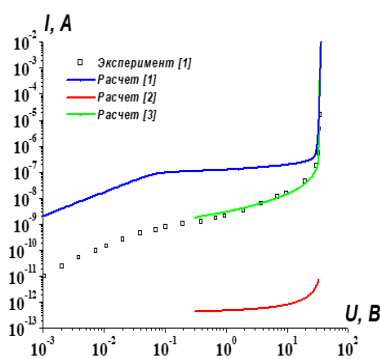


Рис. 1. Сравнение с экспериментом предпробойных токов утечки в m-n-m-структурах с эффектом смыкания

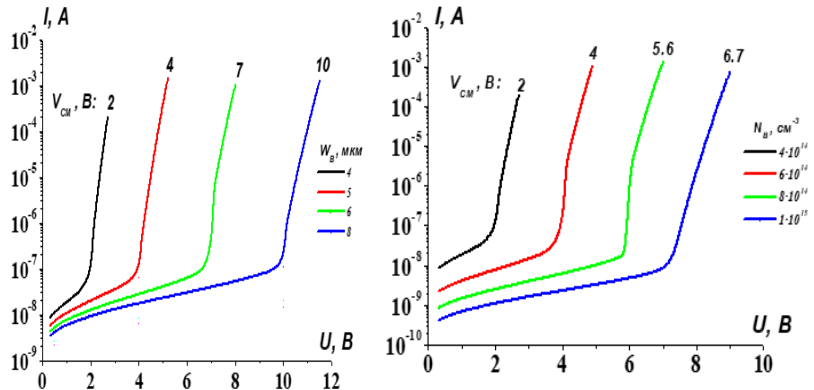


Рис. 2. Влияние параметров базовой области на предпробойные токи утечки в m-n-m-структурах с эффектом смыкания: влияние длины базы (а) и степени легирования базовой области (б)

Влияние параметров базовой области на предпробойные токи утечки в m-n-m-структурах с эффектом смыкания изучены моделированием токовых характеристик структуры изменением основных параметров базовой области, результаты которых приведены на рис. 2. Уменьшение металлургической длины базы приводит к незначительному увеличению токов утечки (рис. 2), тогда как незначительное увеличение степени легирования базовой области приводит к гораздо большим уменьшениям токов утечки (рис. 2), что более наглядно видно из рис. 3, где представлены результаты моделирования токовых характеристик ограничителей напряжения с различными параметрами базовой области, но с одинаковыми напряжениями смыкания равными 4 В.

Таким образом, при конструировании ограничителей напряжения в целях уменьшения токов утечки целесообразно увеличивать степень легирования базовой области, а толщину базовой области подбирать по значению необходимого напряжения пробоя.

Нами были изготовлены кремниевые низковольтные ограничители на основе n^{++} - p - n^{++} -структур с эффектом смыкания, которая содержит эпитаксиальный буферный слой n -типа с концентрацией носителей $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и толщиной $6 \div 10$ мкм, выращенный на подложке кремния n^+ -типа, которая образует эмиттерную область. В эпитаксиальном слое диффузией бора сформирована базовая область p -типа толщиной $2.0 \div 2.5$ мкм с концентрацией носителей $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, на части, поверхности которой диффузией фосфора получена сильнолегированная область коллектора n^{++} -типа с концентрацией носителей $5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 1.5 мкм. В результате в готовой структуре сформированы два выпрямляющих перехода, один с n^{++} - p -переходом, а другой с p - n -переходом.

На рис. 36 представлены сравнительные вольтамперные характеристики кремниевых низковольтных ОН на основе n^{++} - p - n^{++} -структур с эффектом смыкания с промышленно выпускаемыми аналогами типа 2N4736 и 1.5KE6V8A, из которых видно, что полученные нами структуры в предпробойной области имеют на три порядка низкие токи утечки по сравнению с промышленно выпускаемыми аналогами.

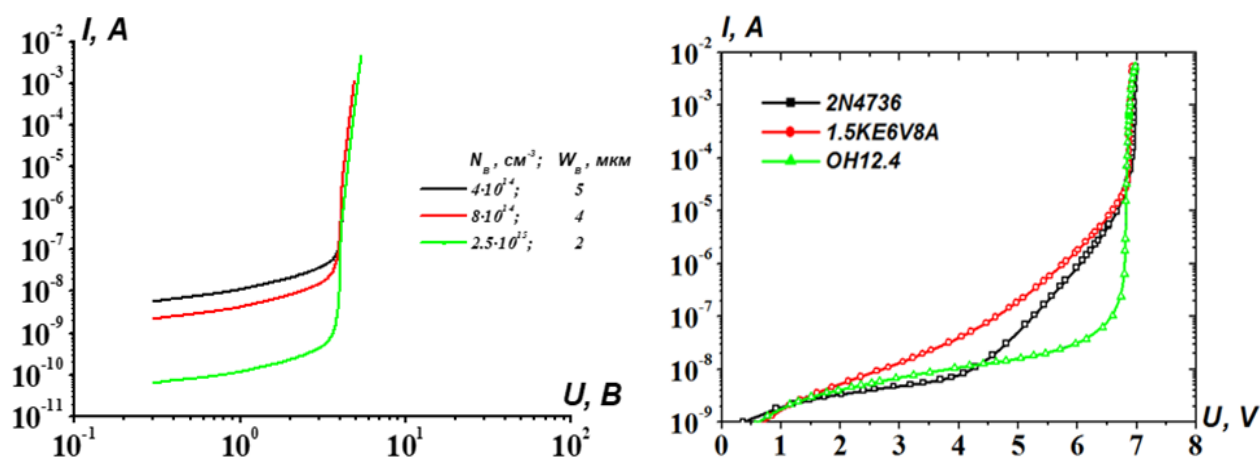


Рис. 3. Пример оптимизации предпробойных токов утечки в n - p - n -структурах с эффектом смыкания (а) и сравнительные вольтамперные характеристики ОН на основе структур с эффектом смыкания с промышленно выпускаемыми аналогами (б)

4. Выводы. Токи утечки в предпробойной области обусловлены необходимостью обеспечения взаимного равенства генерационных и рекомбинационных токов, что приводит к перераспределению потенциала между переходами структуры, в направлении повышения падения напряжения в прямосмещенном переходе и увеличению инжекции неосновных носителей. При конструировании ограничителей напряжения в целях уменьшения токов утечки целесообразно увеличивать степень легирования базовой области, а толщину базовой области подбирать согласно требуемого напряжения пробоя.

Литература:

1. Kaschani K.T. What is Electrical Overstress? - Analysis and Conclusions // Microelectronics Reliability. – 2015. – V. 55, – No. 6. – pp. 853-862.
2. V. Kraz. Origins of EOS in manufacturing environment and its classification // 31st EOS/ESD Symposium. – 2009, 30 Aug.-4 Sept. – paper 1B-1. – pp. 1-5.
3. Small-signal and medium-power diodes, Philips Data Handbook SC01, 1997.
4. Sze S.M., Kwok K.Ng. Physics of semiconductor devices. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. – 815 p.

5. Neamen D.A. Semiconductor physics and devices: basic principles. – New York: McGraw Hill, 2003. – 731 p.
6. Boer K.W. Introduction to space charge effects in semiconductors. – Springer, 2010. – p.219-259.
7. Daoheung Bouangeune, Ye-Ji Lee, Deok-Ho Cho, Kyu-Hwan Shim, Chel-Jong Choi. Reverse Current Conduction Mechanism of Transient Voltage Suppression Diode under Electrostatic Discharge Stress // Materials Transactions. – 2014. – V. 55. – No. 11. – pp. 1733–1737.
8. Daoheung Bouangeune, Yeon-Ho Kil, Sang-Sik Choi, Deok-Ho Cho, Kyu-Hwan Shim, Chel-Jong Choi. Effects of Electrostatic Discharge Stress on Electrical Properties of Bidirectional TVS Zener Diode with Abrupt Junctions // Materials Transactions. – 2013. – V. 54. – No. 11. – pp. 2125–2130.
9. S.S. Choi, D.H. Cho, K.H. Shim. Development of transient voltage suppressor device with abrupt junctions embedded by epitaxial growth technology // Electronic Materials Letters. – 2009. – V. 5. – No. 2. – pp. 59–62.
10. D. Bouangeune, S.-S. Choi, Ch.-J. Choi, Y.-H. Kil, J. W. Yang, D.-H. Cho, K.-H. Shim. Correlation of Reverse Leakage Current Conduction Mechanism and Electrostatic Discharge Robustness of Transient Voltage Suppression Diode // Electronic Materials Letters. – 2014. – V. 10. – No. 5. – pp. 893–898.
11. Sheng-Huei Dai, Chrong-Jung Lin, Ya-Chin King. Leakage Suppression of Low-Voltage Transient Voltage Suppressor // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2008. – V. 55. – № 1. – pp. 206-210.
12. Рахматов А.З., Скорняков С.Л., Каримов А.В., Ёдгорова Д.М., Абдулхаев О.А., Бузруков У.М. Физико-технологические аспекты создания низковольтных ограничителей напряжения на основе кремния // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2010. – № 5-6. – С. 30-35.
13. Рахматов А.З., О.А. Абдулхаев, А.В. Каримов, Д.М. Ёдгорова. Тепловая модель ограничительного диода // Инженерно-физический журнал. – 2012. – Т.85. – № 4. – С.768-775.
14. van Dalen R., Koops G.E.J., Pfennigstorf O. Punch-through diodes as replacement for low-voltage Zener diodes in ESD protection circuits // Journal of Electrostatics. – 2004. – V. 61. – pp. 149-169.
15. van Dalen R., Hurkx G.A.M., Zandt M.A.A., Hijzen E.A., Weijs P.J.W., den Dekker A. Using thin emitters to control BVce0 effects in punch-through diodes for ESD protection // Journal of Electrostatics. – 2002. – V. 56. – pp. 311-329.
16. King Y., Yu B., Pohlman J., Hu Ch. Punchthrough transient voltage suppressor for low-voltage electronics // IEEE Electron Device Letters. – 1995. – V. 16. – № 7. – pp. 303-305.
17. King Y., Yu B., Pohlman J., Hu Ch. Punchthrough diode as the transient voltage suppressor for low-voltage electronics // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1996. – V. 43. – № 11. – pp. 2037-2040.
18. Urresti J., Hidalgo S., Flores D., Roig J., Rebollo J., Mazarredo I. A quasi-analytical breakdown voltage model in four-layer punch-through TVS devices // Solid-State Electronics. – 2005. – V. 49. – № 8. – pp. 1309-1313.
19. J. Urresti, S. Hidalgo, D. Flores, J. Roig, J. Rebollo, I. Mazarredo. Optimisation of very low voltage TVS protection devices // Microelectronics Journal. – 2003. – V. 34. – No. 9. – pp. 809-813.
20. J. Urresti, S. Hidalgo, D. Flores, J. Roig, I. Cortés, J. Rebollo. Lateral punch-through TVS devices for on-chip protection in low-voltage applications // Microelectronics Reliability. – 2005. – V. 45. – No. 7–8. – pp. 1181-1186.
21. J.H. King, J. Philips. Power Absorption Capability of Punch-Through Devices // Proceedings of the IEEE. – 1967. – V. 55. – No. 8. – pp. 1361-1365.
22. de Cogan D. The punch-through diode // Microelectronics. – 1977. – V. 8. – № 2. – pp. 20-23.
23. de Cogan D., Van de Roer Th.G. The temperature stability of punch-through diodes // Solid-State Electronics. – 1978. – V. 21. – pp. 897-900.
24. Sze S.M., Coleman D.J.JR., Loya A. Current transport in metal-semiconductor- metal (MSM) structures // Solid-State Electronics. – Pergamon Press, 1971. – V. 14. – pp. 1209-1218.
25. Lohstroh J., Koomen J.J.M., Van Zanten A.T., Salters R.H.W. Punch-through currents in p+np+ and n+pn+ sandwich structures – I Introduction and basic calculations // Solid-State Electronics. – Pergamon Press, 1981. – V. 24. – № 9. – pp. 805-814.