

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

Захиридин 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 декабря
0452 рақам билан рўйхатга олинган.

Нашр индекси: 344

Нашр учун масъул:
А.Й.Бобоев

Босишига руҳсат этилди:
27.12.2019.
Қоғоз бичими: 60x81 1/8
Босма табоғи: 13,5
Офсет босма. Офсет қоғози.
Адади: 110 дона.
Баҳоси келишилган нарҳда.
Буюртъя №: 165.
“Муҳаррир” 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.
ХОЛМИРЗАЕВ**

Yarimo'tkazgich moddalariga asoslangan konvertorlarni ishlab chiqishda va uning asl parametrlarini saqlanishini o'rganish xossalari..... 28

S.Z. ZAINABIDINOV, Н.Ж. MANSUROV, Н.Ю. 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.ГРЕМЕНOK, 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-фарадный 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 yurqa 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.А.МИРЗААЛИМОВ, Р.АЛИЕВ, Н.А.МИРЗААЛИМОВ	
разработка высокоеффективных и ресурсосберегающих конструкций кремниевых высоковольтных фотоэлектрических устройств.....	89
D.G. КНАЖИВАЕВ, B.Ya. YAVIDOV	
On correlation of T_c and Cu-O _{apex} distance in single layered cuprates.....	97
А. АБДУЛВАХИДОВ, С.ОТАЖНОВ, 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 Ar+.....	107
Н.О. QO'CHQAROV S.B. FAZLIIDDINOV 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
М.А.МУЙДИНОВА, 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 granulalari 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^+ -структуратах и $m-n-m$ -структуратах с эффектом смыкания, расчетные данные сравниены 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 пробойном 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^+-p 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 прямосмешенный переход будем называть эмиттерным, а обратносмешенный 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_b . 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

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

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

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

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:

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

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

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 пренебречь,

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

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, $W_b = L - W_{be} - W_{kb}$.

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

Таким образом, полученное уравнение (33) определяет процессы формирования вольт амперной характеристики $p^+ - n - p^+$ -структур 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 уменьшить 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 прилагаемого напряжения. Чтобы исключить эту область значительного роста токов утечки необходимо увеличить рекомбинационные токи у эмиттерного перехода.

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

$$j_p = \frac{qD_p n_i^2}{N_D (\sqrt{2\pi}L_D + W_B)} \cdot \left\{ \frac{\frac{qn_i}{\tau_0} \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{qN_D} (V_{K1} + V_{kb})}}{\frac{q^2 D_n N_D}{kT} \exp(-\frac{q\varphi_{Bn}}{kT}) \sqrt{\frac{2qN_D}{\epsilon\epsilon_0} (V_{K2} - V_{be})}} + 1 \right\} \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{qV_{ke}}{kT}\right) \right\} \quad (34)$$

Следует отметить, что полученное выражение (34) определяет процессы формирования вольт амперной характеристики т-п-т-структур 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 уменьшить 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 прямосмещенного 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.

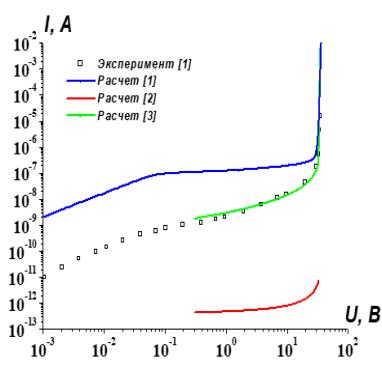


Рис. 1. Сравнение с экспериментом предпробойных токов утечки в т-п-т-структуратах с эффектом смыкания

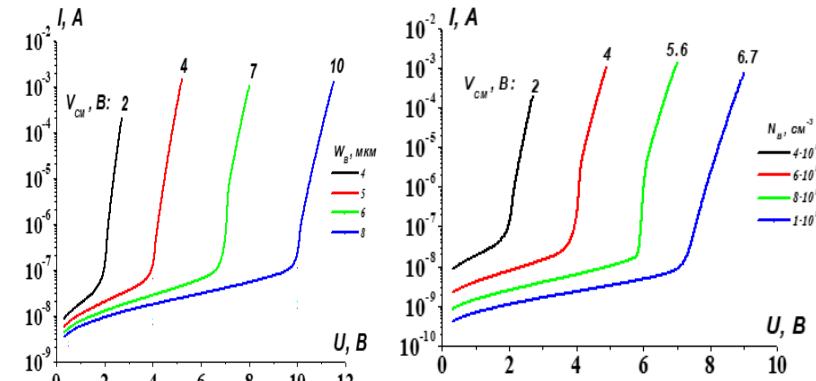


Рис. 2. Влияние параметров базовой области на предпробойные токи утечки в т-п-т-структуратах с эффектом смыкания: влияние длины базы (а) и степени легирования базовой области (б)

Влияние параметров базовой области на предпробойные токи утечки в т-п-т-структуратах с эффектом смыкания изучены моделированием токовых характеристик структуры изменением основных параметров базовой области, результаты которых приведены на рис. 2. Уменьшение металлургической длины базы приводить к незначительному увеличению токов утечки (рис. 2), тогда как незначительное увеличение степени легирования базовой области приводить 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 - 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. 3б представлены сравнительные вольтамперные характеристики кремниевых низковольтных ОН на основе n^{++} - p - n - 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.

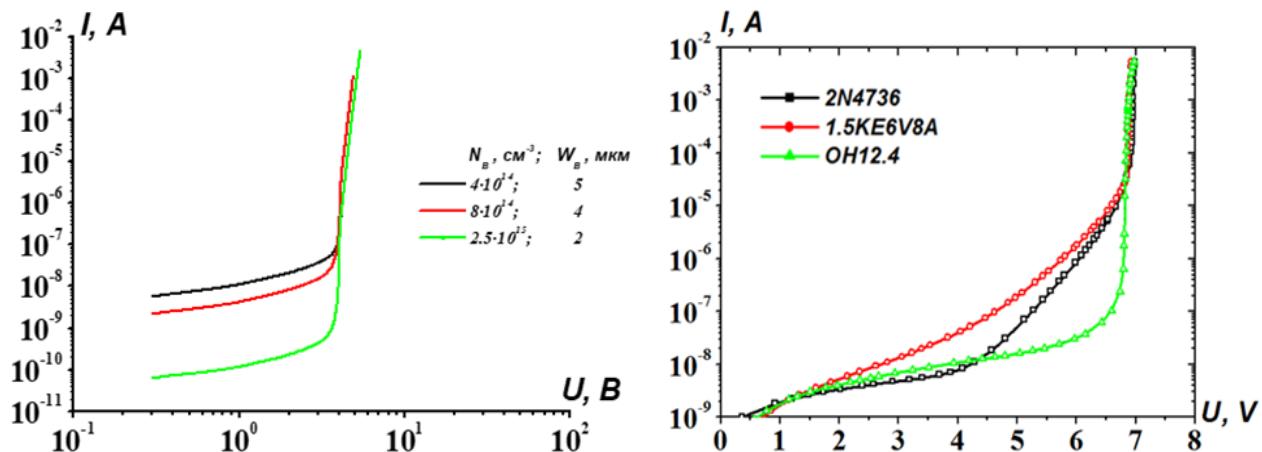


Рис. 3. Пример оптимизации предпробойных токов утечки в n - p - n -структурных с эффектом смыкания (а) и сравнительные вольтамперные характеристики ОН на основе структур с эффектом смыкания с промышленно выпускаемыми аналогами (б)

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., Weijns 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.