

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.382.2:[621.315.592.3+620.192.63]

БУСЛЮК
Виктор Вячеславович

**ШУМОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ
С УПРАВЛЯЕМЫМ УРОВНЕМ ДЕФЕКТНОСТИ
ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Минск 2022

Работа выполнена в учреждении образования «Брестский государственный технический университет» и в ОАО «Цветотрон».

Научные руководители: **Емельянов Виктор Андреевич**, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, главный специалист ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

Дереченник Станислав Станиславович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «ЭВМ и системы» учреждения образования «Брестский государственный технический университет»

Официальные оппоненты: **Лабунув Владимир Архипович**, доктор технических наук, профессор, академик НАН Беларуси, заведующий НИЛ 4.6 «Интегрированные микро- и наносистемы» учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Соловьёв Ярослав Александрович, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по техническим вопросам филиала «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

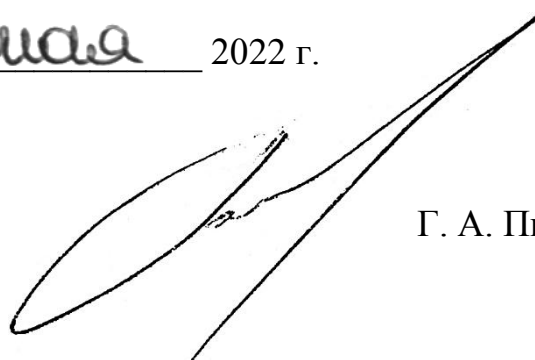
Оппонирующая организация Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению»

Защита состоится «23» июня 2022 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «17» мая 2022 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.15.03
кандидат технических наук, доцент



Г. А. Пискун

ВВЕДЕНИЕ

Для оценки качества цифровых систем передачи информации, маскирования побочных электромагнитных излучений вычислительной техники, создания криптографически случайных числовых последовательностей в аппаратно-программных комплексах защиты информации требуется генерация шума с заданными спектральными характеристиками в широком диапазоне частот. В связи с цифровизацией общества и возрастающей актуальностью защиты информации от несанкционированного доступа эти требования постоянно возрастают.

В качестве источников шума используются полупроводниковые диоды (шумовые диоды, диоды-генераторы шума, лавинно-пролетные диоды, стабилитроны). Такие диоды в режиме обратного смещения генерируют широкополосный шум с высокой спектральной плотностью. Причинами шума являются микроплазменные образования в области пространственного заряда (ОПЗ) диодов, зависящие от неоднородностей структуры, дефектов, а также характера переноса тока в коротких ОПЗ. В связи с тем что шумовые свойства полупроводниковых приборов зависят от состава и постоянства дефектно-примесной структуры, инженерия дефектов позволяет управлять их электрическими параметрами в некотором диапазоне. Важность работы обусловлена отсутствием технических решений, которые могут быть использованы для создания источников шума с расширенными функциональными возможностями, в частности, шумовых полупроводниковых диодов с равномерной спектральной плотностью напряжения шума в широком частотном диапазоне.

Существующие отечественные исследования в этой области связаны либо с геттерированием дефектов в структурах, либо с применением шумовых диодов (ШД). Важным вопросом является также обеспечение воспроизводимости электрофизических параметров приборов, что влияет на их выход годных.

Современные зарубежные аналогичные изделия весьма дорогостоящи, кроме того, разработки для защиты информации не всегда доступны отечественному потребителю.

Таким образом, актуальным для производства и применения ШД является изучение влияния неоднородностей и дефектов на их электрофизические параметры и разработка на этой основе способов управления уровнем структурных дефектов высоколегированных кремниевых структур для улучшения электрических и статистических свойств ШД.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертационной работы соответствует п. 4 «Композиционные и многофункциональные материалы, микро-, опто- и СВЧ-электроника, фотоника, микросенсорика» приоритетных направлений научной, научно-технической

и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021–2025 годы, утвержденных Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156.

Часть результатов работы получена в рамках выполнения ряда научно-исследовательских проектов: ГПНИ «Электроника и фотоника» (задание 1.1.08) по теме «Разработка методов стохастического имитационного моделирования технологических процессов и оценки эксплуатационных свойств гетерогенных пленочных систем кремниевых приборов» (2011–2013, № г.р. 20111591); ГНТП «Разработка и организация серийного производства нового поколения интегральной элементной базы для промышленной и бытовой техники на основе субмикронных, эллионных технологий и функциональной СВЧ-техники» («Бел-электроника»), задание 01.60 (2004–2006, № г.р. 2004869); ГНТП «Разработать и организовать серийное производство новой микроэлектронной и СВЧ-элементной базы, интеллектуальных сенсорных, управляющих и исполнительных микромодулей для промышленной и бытовой техники, экспортных поставок на основе высокоэффективных интегральных технологий и нового поколения оптико-механического, контрольно-измерительного и сборочного оборудования» и ГНТП «Микроэлектроника элементной компонентной базы» («Микроэлектроника ЭКБ», задания МКБ35 и МЭБ28) по темам «Разработать и освоить серийное производство микроэлектронных шумовых модулей» (2014–2016, № г.р. 20141499) и «Разработать и освоить в производстве шумовой диод категории качества ВП» (2016–2018, № г.р. 20164220).

Цель и задачи исследования

Целью исследования является установление закономерностей влияния дефектов в высоколегированных кремниевых структурах на электрофизические параметры шумовых полупроводниковых диодов и создание технологии формирования и стабилизации дефектно-примесного ансамбля для улучшения этих параметров.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать влияние дефектов в кремнии на электрические параметры шумовых полупроводниковых диодов и установить особенности дефектообразования при формировании структур ШД.

2. Разработать новые способы получения стабильного уровня дефектности в области p - n -перехода шумового диода и технологический процесс создания и локализации дислокаций для формирования устойчивых неоднородностей как необходимого условия воспроизводимости шумовых параметров ШД.

3. Предложить технологию финишной обработки готовых структур ШД для снижения концентрации неравновесных собственных точечных дефектов (НСТД) в структуре p - n -перехода высоколегированного слоя кремния, стабилизации дефектно-примесного ансамбля и улучшения параметров ШД.

4. Провести экспериментальные исследования процессов создания ШД по разработанной технологии, изучить влияние предложенных изменений на электрофизические параметры ШД и статистические параметры их шумового сигнала.

Объект исследования – высоколегированные кремниевые слои, *p-n*-переходы и структуры шумовых диодов на их основе.

Предмет исследования – дефекты, включая примеси, в слоях *p-n*-перехода шумовых диодов, электрофизические свойства структур и электрические параметры диодов, а также статистические свойства шумового сигнала.

Научная новизна

– установлены виды дефектов структуры и закономерности их образования, преимущественно влияющие на электрические и статистические параметры кремниевых ШД. Анализ вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик, составляющих тока при прямом и обратном включениях при различных температурах позволил установить величину энергии активации примесей глубоких уровней в структуре, которая составила $(0,45 \pm 0,03)$ эВ. Показано, что лавинный пробой *p-n*-перехода ШД обеспечивается в значительной мере локальными неоднородностями легирования подложки, а также электрической ионизацией глубоких примесных центров технологических (фоновых) примесей меди и железа;

– предложен новый способ изготовления полупроводниковой кремниевой пластины ориентаций (111) и (001), обеспечивающий создание устойчивого уровня дефектности сильнолегированных слоев кремния, используемого для производства ШД. Оптимизация процесса дефектообразования в структуре достигается за счет направленного роста дислокаций под воздействием излучения лазера непрерывного действия ($Y_3Al_5O_{12}$, длина волны 1,064 мкм) путем сканирования с обратной стороны пластины в азотной среде. Последующий термический отжиг обеспечивает релаксацию механических напряжений и делокализацию дислокационной структуры в активную область *p-n*-перехода. Минимальная длина получаемых при этом дислокаций, а также термическая стабильность включений Si_3N_4 в зонах оплавления предопределяет дальнейшую устойчивость дислокаций к воздействию различных технологических факторов;

– предложены и реализованы технологические режимы совмещенного с герметизацией кристаллов отжига высоколегированных структур ШД в диапазоне температур 450–600 °С, включающего три стадии: нагрев до температуры 598–600 °С со скоростью 4–7 °С/мин, изотермическую стадию при температуре (598 ± 2) °С в течение (19 ± 1) мин и охлаждение со скоростью 3,8–5,0 °С/мин. Общее время отжига составляет (80 ± 3) мин. В данных условиях отжига в присутствии технологических примесей кислорода и азота увеличивается концентрация термодоноров, что приводит к формированию устойчивых преципитатов кремния с кислородом. Преципитаты являются эффективными геттерами технологических примесей и способствуют стабилизации дефектно-примесного ансамбля высоколе-

гированных структур. Этим обеспечивается улучшение параметров ШД: сужение диапазона разброса средних значений основных электрических параметров, рост спектральной плотности напряжения шума при снижении ее неравномерности.

Положения, выносимые на защиту

1. Экспериментально установленный механизм активации образования микроплазм при пробое *p-n*-перехода ШД за счет преобладающей генерации носителей с глубоких примесных центров с энергией активации $(0,45 \pm 0,03)$ эВ, соответствующей технологическим фоновым примесям меди и железа в местах структурных дефектов кристаллической решетки кремния и локальных неоднородностей высокого легирования, что позволяет повышать интенсивность микроплазменного шума ШД технологическими методами создания таких несовершенств и геттерирования примесей.

2. Способ генерации дислокаций в структуре кристалла шумового диода пучком лазера диаметром от 10 до 100 мкм и шагом сканирования в 1,5–5 раз больше его диаметра, с длиной волны 1,064 мкм, мощностью на уровне 100 Вт, со скоростью 0,3–1,2 м/с в одном из двух основных типов кристаллографических направлений – $\langle 100 \rangle$ или $\langle 110 \rangle$ и создания дислокационной структуры в активной области *p-n*-перехода в процессе отжига и окисления при температуре 1200 °С в течение не менее 2,5 ч, что дает возможность управлять распределением фоновых технологических примесей в этой области и обеспечить воспроизводимость электрофизических параметров ШД, а также повысить выход годных изделий на 3–5 % в сравнении со структурами, не подвергнутыми сканированию лазером.

3. Технологический маршрут изготовления шумового диода, включающий три стадии: нагрев до температуры 600 °С, изотермическую стадию и охлаждение до температуры 250 °С с общим временем герметизации 170–200 мин, обеспечивающий совмещенный отжиг высоколегированной структуры диода при температуре 450–600 °С в течение (80 ± 3) мин с нагревом со скоростью 4–7 °С/мин, изотермической стадией при температуре (598 ± 2) °С в течение (19 ± 1) мин и охлаждением со скоростью 3,8–5,0 °С/мин, приводящий к снижению концентрации точечных дефектов и дислокаций за счет внутреннего геттерирования на преципитатах SiO_x , что препятствует перераспределению примесей по объему структуры, и позволивший при незначительном снижении (на 30–36 %) граничной частоты шумового сигнала диода и повышении (на 9–10 %) спектральной плотности напряжения шума существенно (до 1,75 раз) снизить ее неравномерность, а также уменьшить в 1,3–2,0 раза разброс средних (от выборки к выборке) значений основных электрофизических параметров ШД.

Личный вклад соискателя ученой степени

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, выносимые на защиту, получены автором самостоятельно. Определение цели и задач

работы, обобщение и обсуждение научных результатов проводилось совместно с научными руководителями: д-м техн. наук, проф., чл.-корр. НАН Беларуси В. А. Емельяновым и канд. техн. наук, доц. С. С. Дереченником. В разработке технологических методов создания дефектов принимал участие заведующий отделом ФТИ НАН Беларуси С. Ф. Сенько. Исследования дефектов структуры и механизма их образования выполнены совместно с учеными и специалистами БГУИР, БГУ, БрГТУ: д-м техн. наук, проф. В. В. Барановым, канд. физ.-мат. наук В. С. Просоловичем, канд. техн. наук В. С. Разумейчик. Совместно с д-м физ.-мат. наук, проф. В. М. Борздовым выполнялись исследования в части моделирования флуктуаций тока методом Монте-Карло. Изготовление образцов ШД производилось с участием специалистов ОАО «ИНТЕГРАЛ», ОАО «Цветотрон»: В. В. Глухманчука, С. И. Ворончука, И. Ю. Нероды, П. Н. Ливая. Апробация ШД в криптографических средствах производилась в МФТИ, ОКБ «САПР», г. Москва, а также в ПГУ с участием д-ра техн. наук, проф. В. А. Конявского, д-ра техн. наук, проф. В. К. Железняк, канд. физ.-мат. наук М. М. Грунтовича.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Материалы, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на XVI и XVIII научно-практических конференциях «Комплексная защита информации», г. Гродно, 2011 г. и г. Брест, 2013 г.; V и VI Международных научных конференциях «Материалы и структуры современной электроники», г. Минск, 2012 и 2014 гг.; VI, VII и IX Международных научно-технических конференциях «Приборостроение», г. Минск, 2013, 2014 и 2016 гг.; Международной научно-технической конференции, приуроченной к 50-летию МРТИ-БГУИР, г. Минск, 2014 г.; 24-й и 25-й Международных конференциях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии КрыМиКо», г. Севастополь, Крым, 2014 и 2015 гг.; 9-й Международной конференции «New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation (NEET)» г. Закопане, Польша, 2015 г.; VIII Международной научной конференции «Физика твердого тела (ФТТ)», г. Минск, 2018 г.

Результаты работы использованы при разработке технологических процессов ШД и внедрены на ОАО «Цветотрон», а также в учебный процесс на кафедре «ЭВМ и системы» БрГТУ по дисциплинам «Электронные приборы» и «Теоретические основы информационно-измерительной техники» для студентов специальности первой ступени высшего образования 1-36 04 02 «Промышленная электроника».

Опубликование результатов диссертации

По материалам диссертационной работы опубликовано 33 печатные работы, в том числе 6 статей в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК, и иностранных изданиях (1 статья в научном издании, включенном в базу *Scopus*), 20 статей в сборниках трудов и материалов международных научных

конференций, 5 патентов Республики Беларусь на изобретения и 2 патента Республики Беларусь на полезные модели.

Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 3,7 авторского листа.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, 5 глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертации составляет 142 страницы. Из них 107 страниц основного текста, в том числе 60 иллюстраций на 48 страницах, 13 таблиц на 16 страницах, 4 приложения на 10 страницах. Библиографический список содержит 137 наименований источников на 8 страницах, список собственных публикаций соискателя – 33 наименования на 4 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **первой главе** рассмотрены методы создания шумовых полупроводниковых приборов, технологические и конструкционные решения, а также литературный обзор основных моделей избыточного шума обратносмещенного *p-n*-перехода шумового диода.

Современные ШД, как правило, производятся по планарной технологии с легированием методом диффузии. Топология типовой структуры близка к топологии низковольтных стабилитронов, работающих в режиме лавинного пробоя, однако имеет ряд отличий, главные из которых – малая (до 500 мкм²) площадь *p-n*-перехода, а также низкое (0,015–0,0035 Ом·см) удельное сопротивление сильнолегированных ($N_A \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $N_D \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$) слоев. Существующие математические модели обратносмещенного диода описывают его электрический пробой и основаны на решении системы дифференциальных уравнений в частных производных для плотности токов электронов и дырок, уравнений Пуассона, непрерывности и уравнения теплопроводности. Однако моделирование токопереноса в ШД с учетом узкого диапазона квазистационарности микроплазменного пробоя требует учета множества специфических факторов, а именно: механизма лавинного умножения носителей зарядов в условиях неравновесности, влияния степени легирования на динамику диффузии при неоднородностях и дефектах структуры. Программ для моделирования ШД, учитывающих изложенные обстоятельства, в настоящее время нет.

В связи с очевидным влиянием дефектов и неоднородностей на параметры ШД установление их состава и величин концентраций – актуальная задача для исследования. Таким образом, для решения задачи стабилизации шумовых параметров и повышения выхода годных ШД необходимо: установить основные виды дефектов, существенно влияющих на микроплазменный шум в структурах кремниевых ШД при лавинном пробое, обеспечить постоянство дислокационной

структуры, а также усовершенствовать режимы отжига структур на финишных технологических операциях для обеспечения внутреннего геттерирования остаточных точечных дефектов внедрения и дислокаций, что положительно повлияет на воспроизводимость и временную стабильность параметров ШД.

Вторая глава посвящена исследованию дефектов высоколегированных структур, используемых для производства ШД, и их влияния на характеристики ШД. Современные представления о дефектообразовании в кремнии условно разделяют все дефекты кристаллической структуры на две группы: ростовые и технологически внесенные. Для ШД особый интерес представляет дефектно-примесное взаимодействие при термической диффузии легирующих примесей, а также технологически внесенные дефекты в сильнолегированных слоях и ОПЗ *p-n*-переходов таких диодов. Особенностью структуры данного типа является необходимость создания глубоких (до 2–5 мкм), расположенных вертикально в объеме полупроводникового кристалла, основного и охранного *p-n*-переходов ШД.

Поскольку для образования микроплазм при лавинном пробое необходимо наличие структурных несовершенств, вызывающих локальные искажения электрического поля и содержащих ловушки с высокой плотностью заряда, создающие внутреннее электрическое поле, то наличие в микроплазменном канале примесей с глубокими центрами (ГЦ) существенно влияет на параметры пробоя даже в тех случаях, когда концентрация ГЦ намного меньше концентрации легирующих примесей. Сведения о составе ГЦ, формирующих микроплазмы, можно получить, исследуя электрофизические параметры ШД и в первую очередь вольт-амперные (ВАХ) и вольт-фарадные (ВФХ) характеристики.

Для этой цели исследованы ВАХ и ВФХ ШД ND102-ND104, изготовленных в ОАО «Цветотрон» (Республика Беларусь) по планарной диффузионной технологии формирования цилиндрических *p-n*-переходов малого (до 15 мкм) диаметра на подложках монокристаллического кремния *p*-типа с ориентацией (111) и удельным электрическим сопротивлением 0,03 Ом·см, а также ШД ND201, изготовленных по аналогичной технологии на подложках монокристаллического кремния *p*-типа с той же ориентацией и удельным электрическим сопротивлением 0,0035 Ом·см.

Измерения ВАХ и ВФХ диодов с целью определения влияния ГЦ на электрофизические параметры ШД производились с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов *Agilent B1500A* (*Agilent Technologies*, США) и зондовой станции *Cascade Summit 11000* (*Cascade Microtech*, США) в интервале температур от минус 60 до плюс 125 °С. Структурные дефекты подложки выявлялись путем травления в селективном хромовом травителе.

При исследовании ВФХ ШД установлено, что зависимость емкости от приложенного обратного смещения при не очень малых (более 3 В) обратных напряжениях практически линейна в представлении $1/C^3 \sim U_{обр}$, что характерно

для плавного p - n -перехода (рисунок 1). Измерения ВАХ показали, что для всех типов диодов напряжение открывания p - n -переходов увеличивается с уменьшением температуры. Прямые ветви ВАХ всех исследованных диодов имеют активационный характер. При построении данных зависимостей в полулогарифмическом масштабе видно, что характеристики имеют экспоненциальную зависимость (рисунок 2).

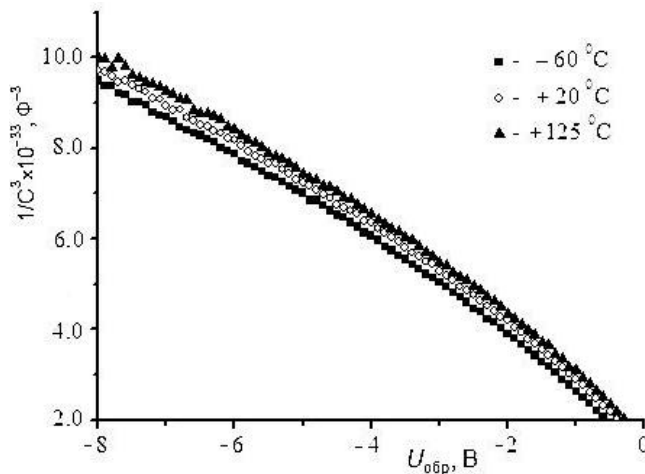


Рисунок 1. – Зависимость $1/C^3$ от величины обратного напряжения для p - n -переходов ШД

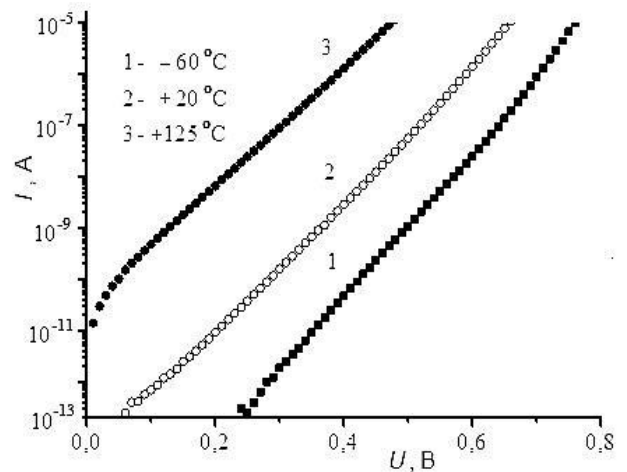
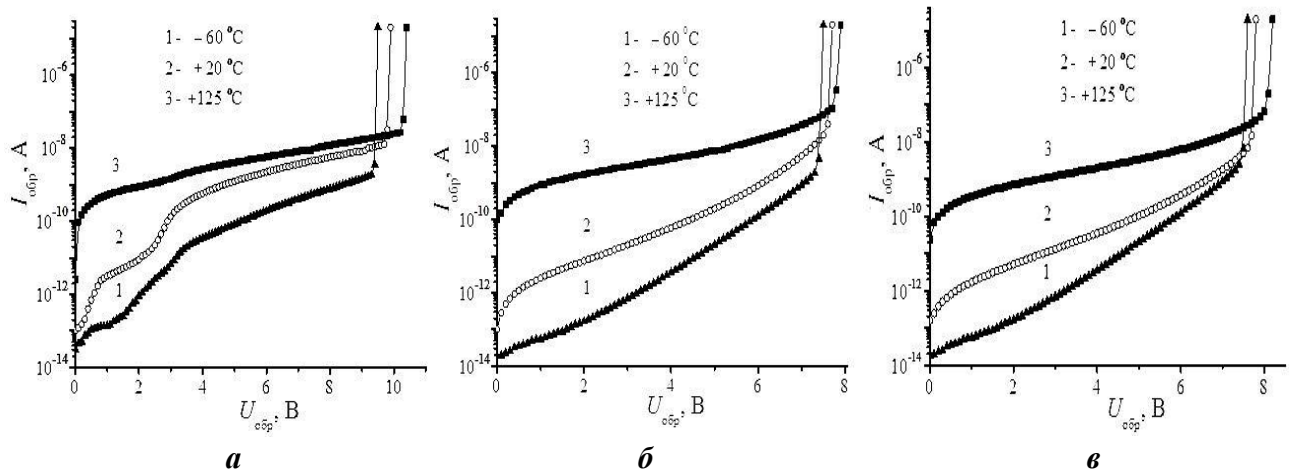


Рисунок 2. – Прямые ветви ВАХ p - n -переходов ШД при различных температурах измерений

Поскольку полный прямой ток p - n -перехода приближенно равен сумме диффузионного и рекомбинационного токов, то в известном экспоненциальном уравнении Шокли для прямой ветви анализировался коэффициент n наклона ВАХ (в логарифмической шкале тока). Причем известно, что $n = 1$, если преобладает диффузионный ток, и $n = 2$, если преобладает рекомбинационный ток. Когда оба тока сравнимы по величине, то $1 < n < 2$. Получены значения коэффициентов n для трех температур, которые находятся в диапазоне от 1,40 до 1,14 для ШД ND103 и в диапазоне от 1,48 до 1,17 для ШД ND201, что подтверждает влияние рекомбинационных токов на ВАХ за счет наличия наряду с основными (неглубокими) глубоких уровней.

Измерения обратных ветвей ВАХ ШД (рисунок 3) показали, что для всех диодов с увеличением температуры напряжение пробоя увеличивается. Полный обратный ток для резкого p - n -перехода можно приблизительно представить суммой диффузионного тока в нейтральной области и генерационного тока в обедненной области. Плотность тока, обусловленного генерацией в обедненной области: $I_{\text{ген}} \sim 1/\tau_v$. Кроме того, $I_{\text{ген}} \sim W \sim (U_0 + U)^{1/2}$, где τ_v – эффективное время жизни носителей заряда, определяемое скоростью генерации электронно-дырочных пар в обедненной области p - n -перехода толщиной W , U_0 – контактная

разность потенциалов. Это позволяет констатировать степенную зависимость генерационного тока от приложенного напряжения U с показателем степени 0,5.



***a* – тип ND102; *б* – тип ND104; *в* – тип ND201**

Рисунок 3. – Обратные ветви вольт-амперных характеристик ШД различных типов

На рисунке 4 приведены обратные ветви ВАХ диодов. При $U_{обp} > 2$ В наблюдается зависимость тока от напряжения $I_{обp} \sim U^n$, что характерно для обратной ветви ВАХ $p-n$ -перехода, в ОПЗ которого преобладает генерация электронно-дырочных пар. В данном случае $n > 1$, что свидетельствует о высокой концентрации рекомбинационно-генерационных центров и их неоднородном распределении.

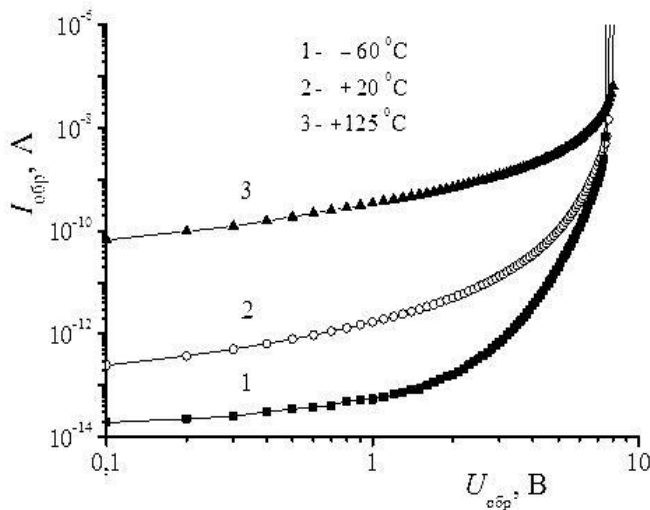


Рисунок 4. – Обратные ВАХ $p-n$ -переходов при различных температурах измерений

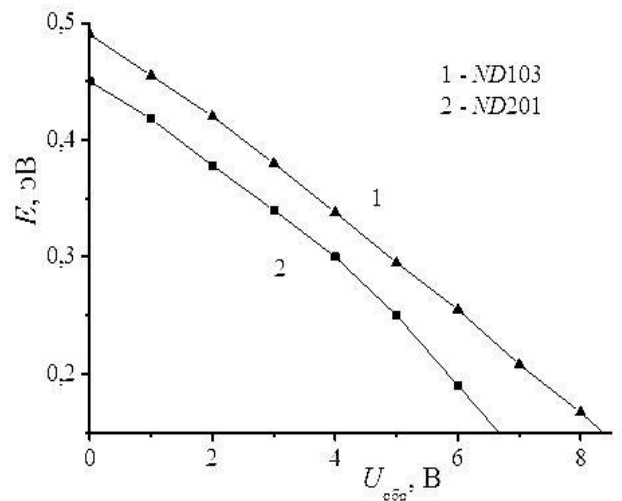


Рисунок 5. – Зависимость энергии активации от обратного напряжения для диодов двух типов

Температурные зависимости обратных токов позволили установить, что энергия активации ШД находится в обратной зависимости от абсолютной

величины приложенного к *p-n*-переходу обратного напряжения, и лежит в диапазоне 0,25–0,45 эВ. При экстраполяции зависимостей энергии активации от приложенного напряжения к нулевому значению напряжения, как показано на рисунке 5, получаем значения энергий ГЦ ($0,45 \pm 0,03$) эВ, которые соответствуют глубине залегания энергетических уровней технологических фоновых примесей железа и меди.

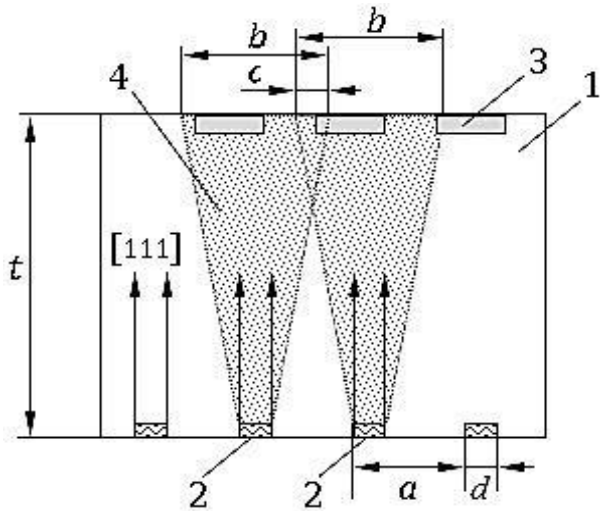
Таким образом, экспериментально установлено, что лавинный пробой *p-n*-перехода ШД обусловлен образованием микроплазм, в первую очередь связанных с локальными неоднородностями высокого легирования материала подложки, а также электрической ионизацией глубоких примесных центров меди и железа, попадающих в монокристалл при различных технологических операциях формирования диодной структуры.

Третья глава посвящена исследованиям закономерностей создания управляемого уровня дефектности в высоколегированных кремниевых структурах ШД.

Создание заданной дефектности в кремниевой пластине обеспечивается лазерным пучком с длиной волны 1,064 мкм, под действием которого на обратной стороне пластины формируются параллельные зоны оплавления. Их расположение соответствует наиболее энергетически выгодным кристаллографическим плоскостям генерации дислокаций. Так как в монокристаллическом кремнии основными плоскостями скольжения дислокаций являются кристаллографические плоскости типа $\{111\}$ и $\{110\}$, то рассматривались структуры, изготовленные на пластинах с такими эквивалентными кристаллографическими плоскостями как (111) и (001). На рисунке 6 показана разметка зон движения дислокаций в поперечном сечении кремниевой пластины ориентации (111) при формировании лучом лазера параллельных зон плавления с определенными шириной и шагом. При этом зоны плавления ориентированы по крайней мере в одном из возможных кристаллографических направлений типа $\langle 112 \rangle$. Ориентация зон оплавления в направлениях $[1\bar{1}0]$, $[10\bar{1}]$ и $[01\bar{1}]$ позволяет сформировать сетку дислокаций в плоскостях (110) и $(11\bar{1})$, (101) и $(1\bar{1}1)$, (011) и $(\bar{1}11)$ попарно.

Генерация дислокаций в этих плоскостях энергетически наиболее выгодна и обусловлена тем, что возникающие от механических напряжений на границе раздела изгибающие моменты перпендикулярны границам этих зон. При этом генерируемые дислокации пересекаются друг с другом на некотором расстоянии от поверхности пластины, в результате чего их дальнейшее проникновение в направлении рабочей поверхности блокируется вследствие образования дислокационных полупетель, закрепленных концами на обратной стороне пластины.

Процесс создания дислокаций проводился в среде азота для формирования включений нитрида кремния на установке лазерного геттерирования ЭМ-227 (ОАО «Планар», Республика Беларусь), позволяющей регулировать размер лазерного пятна.



1 – пластина; 2 – зона плавления; 3 – активная область; 4 – зона генерации дислокаций; a – шаг; b – дислокационный след; c – область перекрытия; d – ширина зоны плавления; t – толщина пластины

Рисунок 6. – Разметка зон движения дислокаций в поперечном сечении кремниевой пластины

ностью плотности дислокаций. Экспериментально установлено, что наибольшая плотность генерируемых дефектов (дислокаций) достигается при соблюдении условия $a = (1,5 \dots 5,0) \times d$. Наилучшие результаты по проценту выхода годных достигнуты при ширине зоны оплавления (d) и шаге зон оплавления (a), равном, соответственно, 50 и 100 мкм. При этом плотность дислокаций находится в диапазоне $5 \times 10^5 - 2 \times 10^6 \text{ см}^{-2}$, а процент выхода годных возрастает на 3–5 %. Пластины с ориентацией (001) по сравнению с (111) имеют лучшие технологические возможности, однако отличаются большей стоимостью и меньшей механической прочностью, что увеличивает себестоимость ШД на их основе.

Последующая термообработка пластины (выполняется в ходе операции разгонки примеси фосфора при температуре 1200 °С в течение 2,5–3 ч) обеспечивает делокализацию образовавшейся дефектной структуры в активную область структуры ШД на лицевой (рабочей) поверхности в наиболее энергетически выгодном кристаллографическом направлении [111] в плоскости $(1\bar{1}0)$, перпендикулярной поверхности. Минимальная длина дислокаций, лежащих в рассматриваемых плоскостях, предопределяет их дальнейшую устойчивость к воздействию технологических факторов, поскольку их расщепление на более короткие звенья менее вероятно.

Фактическое наличие примесных атомов в структуре ШД ND 103L исследовалось с применением масс-спектрометра *TOF.SIMS 5 (IONTOF, Германия)*. Подтверждено, что впоследствии, в ходе технологических процессов отмывок и высокотемпературных обработок, в местах сформированных дислокаций образуется сетка попадающих в структуру вторичных металлов (меди, железа).

Мощность лазерного луча варьировалась от 80 до 120 Вт, диаметр лазерного пятна – от 10 до 100 мкм, скорость сканирования – от 0,3 до 1,2 м/с. При взаимодействии расплавленного кремния с азотом образуются включения нитрида кремния. Включения Si_3N_4 , по сравнению с включениями SiO_2 – за счет более высоких, чем на границе Si-SiO₂, механических напряжений на границе раздела Si-Si₃N₄ и отсутствия полиморфных превращений Si₃N₄ – являются более эффективными для зарождения дислокаций, что приводит к дополнительному расширению дислокационного следа на рабочей поверхности. Воспроизводимость характеристик ШД связана с однородностью

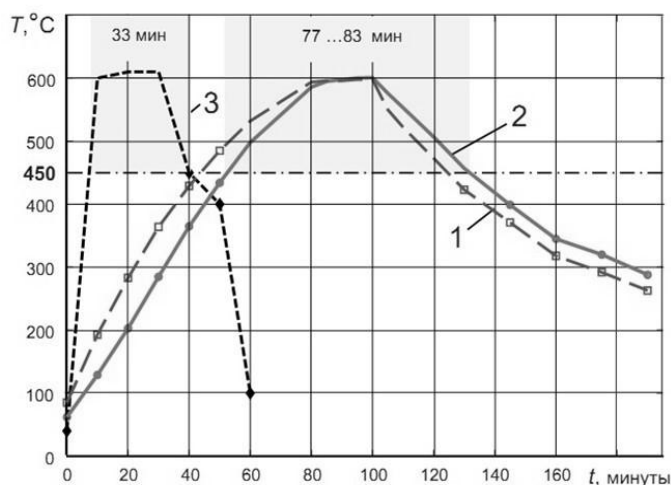
Результаты исследования позволяют утверждать, что легирующая примесь железа распределена по всему объему структуры, а примесь меди находится в приповерхностном слое. Одновременно установлена неравномерность легирования донорной примесью на границе основного перехода шумового диода.

Предложенный способ и проведенные инструментальные и технологические исследования показали возможность управления дефектностью высоколегированных кремниевых структур ШД путем обработки пучком лазера с длиной волны 1,064 мкм, шириной от 10 до 100 мкм и мощностью на уровне 100 Вт, выполняемой с обратной стороны пластины, в одном из двух основных типов кристаллографических направлений – $\langle 100 \rangle$ или $\langle 110 \rangle$, со скоростью сканирования от 0,3 до 1,2 м/с, с последующей делокализацией дислокационной структуры в активную область при температуре 1200 °С в течение не менее 2,5 ч. Созданная дефектность также влияет на распределение фоновых технологических примесей в этой области.

Четвертая глава посвящена разработке технологического процесса отжига готовых структур и ШД в инертных средах в процессе сборочного производства. В ходе исследований предложен метод и технология стабилизации точечных дефектов в структуре p - n -перехода ШД. С учетом значительного содержания кислорода и азота в высоколегированных структурах ШД стабилизация остаточных НСТД на финишных этапах изготовления может быть обеспечена подбором соответствующих режимов отжига и среды его проведения. Формирующиеся при термообработке НСТД существенно влияют на образование электрически активных центров, ответственных за процессы ударной ионизации и генерации-рекомбинации носителей зарядов.

Зависимость концентрации термодоноров кислорода от температуры отжига имеет ярко выраженную область в диапазоне 450–600 °С. При отжиге структур в этом диапазоне температур в течение определенного времени наблюдается рост концентрации термодоноров, что приводит, вероятно, к образованию устойчивых преципитатов. Кроме того, растет концентрация межузельных атомов кремния с неопределенным положением в кристаллической решетке. Причиной такого явления могут быть значительные искажения решетки на границе кремния с кислородными преципитатами из-за практически двукратной разницы в объемах молекулы SiO_2 и атома Si . Межузельные атомы кремния потенциально способны взаимодействовать с кислородом и азотом, образуя преципитаты и устойчивые комплексы. В этих условиях термодоноры и примесные вторичные атомы могут способствовать образованию таких преципитатов и комплексов, которые локализуются вблизи дислокаций и остаются затем стабильными в диапазоне сравнительно невысоких (до +70 °С) температур эксплуатации ШД. Для реализации механизма образования термодоноров предложено выполнять отжиг в процессе герметизации кристаллов ШД.

Отжиг структур производился в печи *PP 40/85 (Sokol-Therm, Deutschland GmbH)* в среде азота одновременно с герметизацией кристаллов в металлостеклянный корпус. При этом использовался стеклокапилляр *JD38 (CIT, Ireland Ltd, Great Britain)*. Оптимизация режимов отжига производилась по критерию максимального выхода годных ШД. Время отжига подбиралось из условия минимального (35 мин – для герметизации диодов в печи «Алунд» по действующему технологическому процессу ОАО «Цветотрон») и максимально допустимого (установлено в ходе исследований) для герметизации металлостеклянного корпуса КД-34 (*minimelf*). Отжиг в диапазоне температур 450–600 °С производился в течение 45–85 мин (девять режимов с шагом 5 мин). Увеличение времени отжига сверх 85 мин приводит к росту технологических потерь ШД по внешнему виду и электропараметрам. Наилучшие результаты были достигнуты при длительности процесса отжига (80 ± 3) мин с нагревом со скоростью 4–7 °С/мин, с изотермической стадией в течение (19 ± 1) мин и охлаждением со скоростью 3,8–5,0 °С/мин. Температурные кривые совмещенного с герметизацией отжига представлены на рисунке 7.



1 – в печи *PP 40/85*; 2 – фактическая температура в кассете герметизации в печи *PP 40/85*; 3 – в печи «Алунд» (по ранее действовавшему технологическому процессу)

Рисунок 7. – Температурные кривые герметизации в печах различного типа с выделенной областью отжига

отожженных без корпуса (один кристалл был утерян в процессе отжига).

Поскольку влияние отжига в обеих выборках оказалось практически идентичным, дальнейший анализ применительно к ШД как конечному изделию выполнялся по объединенной выборке объемом 45 шт. (44 шт. после отжига). В результате отжига изменились средние значения исследуемых параметров: граничной частоты сигнала $f_{гр}$ (снижение на 35,6 %), эффективного напряжения шума $U_{эф}$ (снижение на 6,1 %), спектральной плотности S_U шумового сигнала (увеличение на 9,9 %, при снижении ее неравномерности δS_U в 1,75 раза). При

Методика измерений шумовых характеристик состояла в оценке наборов из 400 измерений (текущих отсчетов напряжения шумового сигнала с частотой дискретизации 50 МГц) по каждому образцу из выборки. Измерения проводились на автоматизированном комплексе измерения электрических параметров шумовых диодов АКИД (ЭКОН. 441111.001, ОАО «Планар», Республика Беларусь). До отжига измерялась исходная выборка из 45 кристаллов, после отжига, совмещенного с герметизацией, – две выборки: 30 собранных ШД, а также 14 кристаллов,

этом заметно снизился разброс средних значений всех исследуемых параметров шума: по $U_{эф}$ – на 61,2 %, по S_U – на 34,2 %, по $f_{гр}$ – на 34,9 %, по δS_U – на 25,9 %. Это свидетельствует о повышении стабильности как самих параметров, так и предложенного технологического процесса в целом.

Таким образом, отжиг сильнолегированных структур с примесями меди и железа в течение (80 ± 3) мин при температуре 450–600 °С на финишной стадии технологического процесса в присутствии азота и кислорода приводит к стабилизации НСТД-дефектов и, как следствие, к улучшению электрофизических параметров ШД и статистических параметров шумового сигнала.

Пятая глава посвящена апробации разработанной технологии ШД и шумовых модулей, созданных на их основе, а также схемам измерений и алгоритмам оценки качества аналоговых и цифровых сигналов ШД и шумовых модулей. Технологические режимы рассчитаны для исходных кремниевых пластин с удельным сопротивлением 0,03 и 0,0035 Ом·см с целью обеспечения требуемых диапазонов электрических параметров шумовых диодов.

В целях импортозамещения разработан новый сплав для пайки, который предназначен для присоединения выводов к кристаллу взамен серебряного припоя марки ПСр15. Сплав не содержит свинца, что улучшает экологические условия производства. Преимущества нового сплава проявляются при герметизации кристаллов в металлостеклянных корпусах за счет снижения температуры его плавления на 10–15 °С. Фосфор, присутствующий в составе сплава с массовой долей $(3,2 \pm 0,4)$ %, обеспечивает геттерирование обратной стороны пластины за счет снижения концентрации точечных дефектов.

Расчеты диффузионных профилей основного p - n -перехода показывают глубину его залегания на уровне 1,5 мкм, плавный характер профиля легирования, а также требуемые пробивные напряжения ШД. Экспериментальные исследования косых шлифов структур показали увеличение глубины залегания p - n -перехода до 2 мкм, что связано с существенным увеличением коэффициента диффузии примеси за счет сформированного дефектно-примесного ансамбля.

Моделирование структуры ДГШ выполнялось с использованием программ *Process Simulation-ATHENA* (Silvaco, США) и *COMSOL MultiPhysics* (COMSOL Inc., США). Моделирование обратной ветви ВАХ ШД подтвердило возможность получения рабочих токов для генерации шума в диапазоне 10–100 мкА, что соответствует диапазону токов известных аналогов ШД. Методом математического моделирования выполнена оценка влияния ударной ионизации на ВАХ и флуктуации тока в некоторых структурах диодов и субмикронных МОП-транзисторов как возможных источников электрического шума.

Для подтверждения результатов разработанной технологии исследованы статистические свойства сигнала ШД и разработанных на их основе шумовых аналогово-цифровых модулей. Разработаны алгоритмы цифровой обработки наблюдаемых сигналов, в том числе алгоритм получения телеграфного сигнала

из линейного и преобразования его в цифровой код. Получены распределения напряжения шума и длительности импульсов сигнала, функция автоковариации линейного сигнала и взаимная ковариационная функция телеграфных сигналов двух каналов шумового модуля. Результаты подтвердили функциональные свойства ШД, изготовленных по усовершенствованной технологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. На основе анализа ВФХ и ВАХ в режимах прямого и обратного включения при положительных и отрицательных температурах, с учетом масс-спектров ВИМС установлены виды дефектов в структурах ШД, преимущественно влияющих на их шумовые свойства [18, 22]. Для кремниевых ШД ND102–ND104 и ND201, изготовленных по планарной диффузионной технологии формирования цилиндрических *p-n*-переходов малого (до 15 мкм) диаметра на подложках монокристаллического кремния *p*-типа, с ориентацией (111) и удельным электрическим сопротивлением соответственно 0,03 и 0,0035 Ом·см, энергии активации этих дефектов лежат в интервале $(0,45 \pm 0,03)$ эВ. Эти значения энергии позволяют идентифицировать наличие фоновых технологических примесей меди и железа, ионизация которых, в том числе, приводит к возникновению микроплазменного шума [16, 23, 25, 26]. Равномерное и устойчивое распределение технологических примесей по объему *p-n*-перехода кристалла ШД является необходимым условием квазистационарности шума [2, 3].

2. Предложена технология создания дефектов в полупроводниковых кремниевых пластинах оптимальной кристаллографической ориентации, используемых для ШД [4]. Сущность данной технологии состоит в том, что стабильная дислокационная структура в зоне *p-n*-перехода достигается эффективным управлением распределения неконтролируемых примесей. Процесс оплавления локальных зон производится с обратной стороны пластин кремния (111) или (001) с помощью лазерного пучка с длиной волны 1,064 мкм и мощностью порядка 100 Вт с последующим высокотемпературным отжигом при окислении и проращиванием дислокаций на планарную сторону пластины. Равномерное их распределение по объему *p-n*-перехода кристалла обеспечивается за счет сформированных дефектов структуры с образованием Si_3N_4 . Установлено, что наибольшего выхода годных ШД можно достичь при выполнении параллельных зон оплавления шириной $d = (10\text{--}100)$ мкм с шагом $a = (1,5\text{--}5,0) \times d$, с последующей делокализацией дислокационной структуры в активную область при температуре 1200 °С в течение не менее 2,5 ч. Обеспечение стабильности и равномерности дефектов в зоне *p-n*-перехода ШД за счет предложенной технологии позволяет увеличить на 3–5 % выход годных изделий по сравнению с образцами, не подвергнутыми воздействию лазера [5, 6, 28–33].

3. Разработана технология герметизации и отжига готовых полупроводниковых структур и кристаллов ШД [11, 12]. В сильнолегированных структурах при отжиге в диапазоне температур 450–600 °С происходит рост концентрации термодоноров кислорода, азота и межузельных атомов кремния. Значительное содержание ионов кислорода в области *p-n*-перехода кристалла позволяет констатировать, что в результате отжига происходит внутреннее геттерирование остаточных точечных дефектов и дислокаций на преципитатах SiO_x. Показано, что отжиг кристаллов и готовых ШД на финишных операциях при времени отжига (80 ± 3) мин в этом температурном диапазоне является эффективным методом стабилизации шумовых параметров и обеспечивает повышение спектральной плотности шума и значительное (более чем в 1,7 раза) снижение ее неравномерности. Важнейшим результатом этого отжига является снижение разброса значений исследуемых параметров шума: по $U_{эф}$ – на 61,2 %, по S_U – на 34,2 %, по $f_{гр}$ – на 34,9 %, по δS_U – на 25,9 % [6]. Это позволяет улучшить качество случайных числовых последовательностей в программно-аппаратных комплексах защиты информации [15, 17].

4. Предложенные технологии апробированы в производстве ШД и аналого-цифровых шумовых модулей на их основе. Выполнено моделирование электрофизических параметров приборов [20] и оценено влияние ударной ионизации на ВАХ и флуктуации тока в ШД и субмикронных МОП-транзисторах [7, 19, 21, 24]. Для повышения качества ШД и обеспечения импортозамещения разработан новый сплав для пайки электронных приборов [27]. Для оценки качества ШД были разработаны и реализованы измерительные схемы и алгоритмы цифровой обработки шумовых сигналов. Это подтвердило состоятельность разработанных технологических методов как для дискретных ШД [9, 10, 13, 14, 15], так и для аналого-цифровых шумовых модулей [1, 8].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты исследований внедрены в производство на ОАО «Цветотрон», г. Брест, объем выпуска ШД по новой технологии по состоянию на 01.07.2021 составил 1 млн 710 тыс. шт. на сумму, эквивалентную 1 млн 709 тыс. дол. США. При этом более 85 % изделий реализовано на экспорт. Результаты исследования внедрены также в учебный процесс на кафедре «ЭВМ и системы» БрГТУ.

Результаты работы также могут быть использованы:

- 1) для конструктивно-технологического совершенствования ШД с целью их миниатюризации и расширения температурного диапазона использования;
- 2) для развития численных моделей электронного переноса и программ моделирования шумовых характеристик полупроводниковых приборов, а также для исследования других приборов подобного класса (светодиодов, стабилитронов, стабисторов) с учетом влияния дефектов структуры на микроплазменный пробой обратносмещенного *p-n*-перехода.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Оценка вероятностных характеристик случайных сигналов микроэлектронного шумового модуля/ В. С. Разумейчик, В. В. Буслюк, С. С. Дереченник, В. И. Поляков, С. В. Лапич // Вестник Брестского государственного технического университета. Физика, математика, информатика. – 2014. – № 5 (89). – С. 41–45.
2. Электрофизические параметры генераторных диодов для создания широкополосного шума/ В. В. Буслюк, И. Ю. Нерода, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, Ю. Н. Янковский, Р. А. Лановский // Журнал Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2017. – № 1. – С. 95–99.
3. Physical Parameters of the Broadband Noise-Generator Diodes / V. V. Buslyuk, V. B. Odzhayev, A. K. Panfilenko, A. N. Petlitsky, V. S. Prosolovich, V. A. Filipyena, Yu. N. Yankovsky // Russian Microelectronics. – 2020. – Vol. 49, № 4. – P. 295–301.
4. Буслюк, В. В. Технология кремниевых диодов генераторов шума / В. В. Буслюк // Электроника НТБ. – 2021. – № 4. – С. 136–138.
5. Формирование стабильной дефектной структуры в кремниевых диодах генераторов шума/ В. В. Емельянов, В. А. Емельянов, В. В. Баранов, В. В. Буслюк // Весці НАН Беларусі. Сер. Фізіка-тэхнічных навук. – 2021. – Т. 66, № 2. – С. 145–153.
6. Стабилизация шумовых параметров при отжиге высоколегированных структур диодов-генераторов шума/ В. В. Буслюк, В. А. Емельянов, В. В. Баранов, С. С. Дереченник, В. С. Просолович // Доклады БГУИР. – 2021. – Т. 19, № 6. – С. 32–41.

Статьи в других научных изданиях

7. Жевняк, О. Г. Моделирование методом Монте-Карло флуктуаций тока стока в субмикронном МОП-транзисторе / О. Г. Жевняк, В. В. Буслюк, В. М. Борздов // Электроника инфо. – 2013. – № 3 (93). – С. 20–22.
8. Особенности формирования и факторы качества случайных сигналов специализированного шумового модуля/ В. В. Буслюк, С. С. Дереченник, И. В. Лешкевич, В. С. Разумейчик, И. А. Пешко // Электроника инфо. – 2015. – № 6 (120). – С. 46–49.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

9. Шумовые свойства кремниевых стабилитронов малой мощности при обратном смещении/ В. В. Буслюк, С. И. Ворончук, И. В. Лешкевич, Б. Н. Склипус, Р. В. Сченснович // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств : материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 25–26 мая 2006 г. : в 2 т. / Полоц. гос. ун-т. –Новополоцк, 2006. – Т. 1. – С. 241–243.

10. Кремниевые диоды-генераторы шумовых импульсных последовательностей/ О. К. Барановский, П. В. Кучинский, В. В. Буслюк, С. И. Ворончук, И. В. Лешкевич, С. С. Дереченник // Материалы и структуры современной электроники : сб. науч. тр. II Междунар. науч. конф., Минск, 5–6 окт. 2006 г. / Белорус. гос. ун-т, М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. фонд фонд. исслед. – Минск, 2006. – С. 58–61.

11. Проблемы оптимизации температурного режима герметизации диодов в металлостеклянном корпусе/ В. В. Буслюк, С. С. Дереченник, В. В. Баранов, А. Ф. Козак, И. Ю. Нерода // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств : материалы V Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 29–30 мая 2008 г. : в 3 т. / Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2008. – Т. II. – С. 64–68.

12. Расчет теплового сопротивления конструкции диодов в металлостеклянном корпусе/ С. С. Дереченник, В. В. Буслюк, В. В. Лаврентьев, И. В. Простов // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств : материалы V Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 29–30 мая 2008 г. : в 3 т. / Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2008. – Т. III. – С. 19–22.

13. Кремниевые диоды-генераторы шума серии ND 100 для криптографических систем/ В. В. Буслюк, С. И. Ворончук, И. В. Лешкевич, С. С. Дереченник // Комплексная защита информации (КЗИ-2009) : материалы XIV Междунар. конф., Могилев, 19–22 мая 2009 г. / Всерос. науч.-исслед. ин-т проблем выч. техники и информатизации ; Науч.-исслед. ин-т техн. защиты информации [и др.]. – Минск, 2009. – С. 61–63.

14. Концепция оценки для оперативного контроля источников шумового сигнала / В. К. Железняк, К. Я. Раханов, Д. С. Рябенко, В. В. Буслюк, С. И. Ворончук, И. В. Лешкевич, С. С. Дереченник // Комплексная защита информации (КЗИ-2011) : материалы XVI науч.-практ. конф., Гродно, 17–20 мая 2011 г. – Минск, 2011. – С. 273–276.

15. Буслюк, В. В. Режимы применения кремниевых генераторных диодов для создания широкополосного шума / В. В. Буслюк, С. И. Ворончук, И. В. Лешкевич // Материалы и структуры современной электроники : сб. науч. тр. V Междунар. науч. конф., Минск, 10–11 окт. 2012 г. / Белорус. гос. ун-т, М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. фонд фонд. исслед. – Минск, 2012. – С. 24–27.

16. Электрофизические параметры генераторных диодов для создания широкополосного шума/ В. В. Буслюк, В. С. Просолович, Ю. Н. Янковский, В. В. Черный // Приборостроение–2013 : материалы VI Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 20–22 нояб. 2013 г. / Белорус. нац. тех. ун-т. – Минск, 2013. – С. 271–272.

17. Применение диодов-генераторов шума в средствах криптографической защиты информации: материалы XVIII науч.-практ. конф. «Комплексная защита

информации (КЗИ-2013)», Брест, 21–24 мая 2013 г. / В. В. Буслюк, В. А. Тюнин, П. Н. Лаптев, С. И. Ворончук, И.В. Лешкевич // Электроника инфо. –2013. – № 6 (96). – С. 154–155.

18. Флуктуации лавинного тока на нерегулярностях структур диодного типа / С. С. Дереченник, В. В. Буслюк, Ю. Н. Янковский, А. М. Стрибук // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ-БГУИР : материалы конф., Минск, 18–19 марта 2014 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. : в 2 ч. – Минск, 2014. – Ч. 2. – С. 75–76.

19. Борздов, А. В. Моделирование влияния процесса ударной ионизации на шум тока в глубокосубмикронном кремниевом диоде / А. В. Борздов, В. М. Борздов, В. В. Буслюк // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (CriMiCo 2014) : материалы 24-й Междунар. конф., Севастополь, 7–13 сент. 2014 г. : в 2 т. / Севастоп. нац. тех. ун-т [и др.]. – Севастополь, 2014. – Т. 2. – С. 805–806.

20. Сквозное моделирование кремниевых диодов-генераторов шума для конструкторско-технологической оптимизации / В. В. Буслюк, С. С. Дереченник, О. О. Латий, Ю. Н. Янковский // Материалы и структуры современной электроники : сб. науч. тр. VI Междунар. науч. конф., Минск, 8–9 окт. 2014 г. // Белорус. гос. ун-т, М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. фонд фонд. исслед. – Минск, 2014. – С. 37–40.

21. Борздов, А. В. Моделирование методом Монте-Карло влияния ударной ионизации на ВАХ и флуктуации тока в кремниевом диоде со структурой n^+-n-n^+ / А. В. Борздов, В. М. Борздов, В. В. Буслюк // Материалы и структуры современной электроники : сб. науч. тр. VI Междунар. науч. конф., Минск, 8–9 окт. 2014 г. / редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Изд. центр БГУ, 2014. – С. 40–43.

22. Вольт-амперные характеристики генераторных диодов для создания широкополосного шума / В. В. Буслюк, В. С. Просолович, Ю. Н. Янковский, Д. А. Русакевич // Приборостроение–2014 : материалы VII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–21 нояб. 2014 г. – Минск : БНТУ, 2014. – С. 268–269.

23. Electrical – Physical Parameters of the Silicon Diodes – Noise Generators / V. V. Busliuk, V. B. Odzhaev, A. N. Pyatlitski, V. S. Prosolovich, V. A. Filipenya, S. V. Shvedau, Yu. N. Yankouski // New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation (NEET 2015) : proc. 9th Int. Conf., Zakopane, Poland, June 23–26, 2015. – Lublin, Poland : Lublin University of Technology, 2015. – P. 90.

24. Борздов, А. В. Моделирование флуктуаций плотности тока в субмикронном кремниевом диоде / А. В. Борздов, В. М. Борздов, В. В. Буслюк // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (CriMiCo 2015) : материалы 25-й

Международ. конф., Севастополь, 6–12 сент. 2015 г. : в 2 т. / Севастоп. нац. техн. ун-т [и др.]. – Севастополь, 2015. – Т. 1. – С. 123–124.

25. Анализ вольт-амперных характеристик диодов-генераторов широкополосного шума / В. В. Буслюк, В. Б. Оджаев, А. К. Панфиленко, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, С. В. Шведов, В. А. Филипена, В. В. Черный, В. Ю. Явид, Ю. Н. Янковский, Р. А. Лановский // Приборостроение–2016 : материалы IX Международ. науч.-техн. конф., Минск, 19–21 нояб. 2016 г. – Минск: БНТУ, 2016. – С. 280–281.

26. Генерационно-рекомбинационные процессы в диодах-генераторах широкополосного шума / В. В. Буслюк, В. Б. Оджаев, А. К. Панфиленко, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, В. А. Филипена, Ю. Н. Янковский // Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ–2018) : сб. докл. VIII Международ. науч. конф., г. Минск, 24–28 сент. 2018 г. : в 3 т. / НПЦ НАН Беларуси по материаловедению; редкол.: Н. М. Олехнович (пред.) [и др.]. – Минск, 2018. – Т. 3. – С. 216–218.

Патенты

27. Сплав для пайки электронных приборов: пат. ВУ 13824 / Г. В. Купченко, А. В. Майонов, О. А. Поко, Е. А. Азаркова, В. В. Буслюк. – Оpubл. 27.08.2010.

28. Полупроводниковая кремниевая пластина ориентации (111) для изготовления шумовых диодов: полез. модель ВУ 11541 U / В. В. Емельянов, В. А. Емельянов, С. Ф. Сенько, В. В. Буслюк, В. С. Просолович, С. С. Дереченник. – Оpubл. 30.10.2017.

29. Полупроводниковая кремниевая пластина ориентации (001) для изготовления шумовых диодов: полез. модель ВУ 11542 U / В. В. Емельянов, В. А. Емельянов, С. Ф. Сенько, В. В. Буслюк, В. С. Просолович, С. С. Дереченник. – Оpubл. 30.10.2017.

30. Способ изготовления полупроводниковой кремниевой пластины ориентации (001): пат. ВУ 22406 С2 / В. В. Емельянов, В. А. Емельянов, С. Ф. Сенько, В. В. Буслюк, В. С. Просолович, С. С. Дереченник. – Оpubл. 30.12.2018.

31. Способ изготовления полупроводниковой кремниевой пластины ориентации (111): пат ВУ 22465 С2 / В. В. Емельянов, В. А. Емельянов, С. Ф. Сенько, В. В. Буслюк, В. С. Просолович, С. С. Дереченник. – Оpubл. 30.12.2018.

32. Полупроводниковая кремниевая пластина ориентации (001) для изготовления шумовых диодов: пат. ВУ 22471 С2 / В. В. Емельянов, В. А. Емельянов, С. Ф. Сенько, В. В. Буслюк, В. С. Просолович, С. С. Дереченник. – Оpubл. 30.12.2018.

33. Полупроводниковая кремниевая пластина ориентации (111) для изготовления шумовых диодов: пат. ВУ 22472 С2 / В. В. Емельянов, В. А. Емельянов, С. Ф. Сенько, В. В. Буслюк, В. С. Просолович, С. С. Дереченник. – Оpubл. 30.12.2018.



РЭЗІЮМЭ

Буслюк Віктар Вячаслававіч

Шумавыя паўправадніковыя дыёды з кіраваным узроўнем дэфектнасці высокалегіраваных крэмніевых структур

Ключавыя словы: шумавыя дыёды, высокалегіраваныя структуры, неаднастайнасці структуры, узровень дэфектнасці, адпал.

Мэтапрацы: ўсталяванне заканамернасцяў ўплыву дэфектаў у высокалегіраваных крэмніевых структурах на электрафізічныя параметры паўправадніковых шумавых дыёдаў (ШД) і стварэнне тэхналогіі і фармавання і стабілізацыі дэфектно-прымеснага ансамблю для паляпшэння гэтых параметраў.

Метадыдаследванняў і апаратура: другасна-іённая мас-спектраскапія, аптычная мікраскапія, стандартныя метадыкі вымярэння электрычных характарыстык паўправадніковых прыбораў.

Асноўныя вынікі: эксперыментальна ўстаноўлены віды дэфектаў у структурах ШД, якія пераважна ўплываюць на іх шумавыя ўласцівасці. Для ШД серыі ND, вырабленых па планарнай дыфузійнай тэхналогіі фарміравання цыліндрычных *p-n*-пераходаў малога дыяметра (да 15 мкм) на падкладках крэмнія *p*-тыпу, з арыентацыяй (111) і удзельным электрычным супрацівам 0,03–0,0035 Ом·см, энергіі актывацыі дэфектаў ляжаць у інтэрвале $(0,45 \pm 0,03)$ эВ. Такія значэнні энергій дазваляюць усталяваць наяўнасць фонавых прымешак (медзь і жалеза) і канстатаваць, што адна з прычын шуму – іянізацыя складаючых аснову мікраплазм тэхналагічных прымешак. Раўнамернае іх размеркаванне па аб'ёму *p-n*-перахода можа забяспечвацца за кошт спецыяльнасфармаваных у ходзе тэхналагічнага працэсу дэфектаў структуры з утвареннем Si₃N₄. Устаноўлена, што найбольшага выхаду прыдатных ШД можна дасягнуць пры мэтанакіраваным стварэнні дыслакацый у падкладцы, шляхам выканання паралельных зон аплаўлення са зваротнага боку пласціны лазерам з шырынёй прамяня $d = (10–100)$ мкм і з крокам $a = (1,5 \dots 5,0) \times d$, з наступным адпалам структур пры тэмпературы 1200 °С на працягу 2,5 гадзін. Паказана, што сумешчаны з герметызацыяй адпал ШД на працягу (80 ± 3) хвілін пры тэмпературы 450–600 °С у прысутнасці азоту і кіслароду зніжае канцэнтрацыю электрычна актыўных прымесных атамаў, што павялічвае канцэнтрацыю тэрмадонараў і вядзе да фарміравання ўстойлівых прэціпітатаў крэмнія з кіслародам. Спектральная шчыльнасць шуму павялічваецца са значным (больш чым у 1,7 раз) зніжэннем яе нераўнамернасці. Роскід асноўных электрафізічных параметраў ШД памяншаецца ў 1,3–2 разы.

Ступень выкарыстання: вынікі даследаванняў выкарыстаны пры распрацоўцы тэхналагічных працэсаў вырабу крышталяў і ШД.

Вобласць прымянення: мікра- і нанаэлектроніка, крыніцы фізічнага шуму для сістэм абароны інфармацыі і метралогіі.

РЕЗЮМЕ

Буслюк Виктор Вячеславович

Шумовые полупроводниковые диоды с управляемым уровнем дефектности высоколегированных кремниевых структур

Ключевые слова: шумовые диоды, высоколегированные структуры, неоднородности структуры, уровень дефектности, отжиг.

Цель работы: установление закономерностей влияния дефектов в высоколегированных кремниевых структурах на электрофизические параметры ШД и создание технологии формирования и стабилизации дефектно-примесного ансамбля для улучшения этих параметров.

Методы исследования: вторично-ионная масс-спектрометрия, оптическая микроскопия, стандартные методики измерения электрических характеристик ПП.

Основные результаты: экспериментально установлены виды дефектов в структурах ШД, преимущественно влияющие на их шумовые свойства. Для кремниевых ШД серии ND, изготовленных по планарной диффузионной технологии формирования цилиндрических *p-n*-переходов малого диаметра (до 15 мкм) на подложках кремния *p*-типа, с ориентацией (111) и удельным электрическим сопротивлением 0,03–0,0035 Ом·см, энергии активации дефектов лежат в интервале $(0,45 \pm 0,03)$ эВ. Такие значения энергий позволяют установить наличие фоновых примесей (медь и железо) и констатировать, что одна из причин шума – ионизация составляющих основу микроплазм технологических примесей. Равномерное их распределение по объему *p-n*-перехода кристалла может обеспечиваться за счет специально сформированных в ходе технологического процесса дефектов структуры с образованием Si_3N_4 . Установлено, что наибольшего выхода годных ШД можно достичь при целенаправленном создании дислокаций в подложке, путем выполнения параллельных зон оплавления с обратной стороны пластины лазером с шириной луча $d = (10–100)$ мкм и шагом $a = (1,5 \dots 5,0) \times d$, с последующим отжигом структур при температуре 1200 °С в течение 2,5 ч. Показано, что совмещенный с герметизацией отжиг ШД в течение (80 ± 3) мин при температуре 450–600 °С в присутствии азота и кислорода снижает концентрацию электрически активных примесных атомов, что увеличивает концентрацию термодоноров и приводит к формированию устойчивых преципитатов кремния с кислородом. Возрастает спектральная плотность шума при значительном (более чем в 1,7 раза) снижении ее неравномерности. В 1,3–2 раза уменьшается разброс значений основных электрофизических параметров ШД.

Степень использования: результаты исследований использованы при разработке технологических процессов изготовления кристаллов и ШД.

Область применения: микро- и нанoeлектроника, источники физического шума для систем защиты информации и метрологии.

SUMMARY

Busliuk Victor Vyacheslavovich

**Noise semiconductor diodes with a controllable level of defectiveness
of high-alloy silicon structures**

Keywords: noise diodes, high-alloy structures, inhomogeneity of the structure, level of defectiveness, annealing.

Work objective: determination of the influence of defects in high-alloy silicon structures on the electrophysical parameters of noise semiconductor diodes and creation of the technology for the defect-dop ensemble forming and stabilization targeted at improving these parameters.

Research methods: secondary ion mass spectroscopy, microscopy, standard methods for measuring electrical characteristics semiconductor devices.

Main results: the types of defects in noise diode (ND) structures have been experimentally established, which mainly affect their noise properties. For silicon NDs of the ND series manufactured by the planar diffusion technology of forming cylindrical *p-n*-junctions of small diameter (up to 15 μm) on single-crystal *p*-type silicon substrates, with (111) orientation and specific electrical resistance 0,03–0,0035 Ohm-cm, the defect activation energies are in the range of $(0,45 \pm 0,03)$ eV. Such energy values allow one to establish the presence of background impurities (copper and iron) and state that one of the causes of noise is the ionization of technological impurities that form the basis of microplasmas. Their uniform distribution over the volume of the *p-n*-junction of the crystal can be due to structural defects with the formation of Si_3N_4 , specially formed during the technological process. It was found that the highest yield of suitable ND can be achieved by purposefully creating dislocations in the substrate by making parallel reflow zones on the back side of the plate by a laser with a beam width $d = (10\text{--}100)$ μm , step $a = (1,5\text{--}5,0) \times d$, followed by annealing the structures at a temperature of 1200 °C for 2,5 hours. It has been shown that annealing of ND, combined with sealing, performed for (80 ± 3) minutes at a temperature of 450–600 °C in the presence of nitrogen and oxygen, reduces the concentration of electrically active impurity atoms, which increases the concentration of thermal donors and leads to the formation of stable precipitates of silicon with oxygen. As a result, the spectral density of noise increases with a significant (more than 1,7 times) reduces its unevenness. In addition, the variation of the basic electrophysical parameters of ND is 1,3–2 times smaller.

Degree of usage: the research results were used in the development of technological processes for the manufacture of crystals and ND.

Area of application: micro- and nanoelectronics, sources of physical noise for the information security and metrology systems.

Научное издание

Буслюк Виктор Вячеславович

**ШУМОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ
С УПРАВЛЯЕМЫМ УРОВНЕМ ДЕФЕКТНОСТИ
ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Подписано в печать 05.05.2022. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,4. Тираж 60 экз. Заказ 61.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск,