

тов эмпирических испытаний как в задачах контроля качества выпускаемого бетона [7], так и в задачах оценивания его фактической прочности в уже существующих и эксплуатируемых конструкциях [8]. Получаемые при этом результаты имеют известную (и заранее назначаемую) статистическую обеспеченность (достоверность, доверительную вероятность). Эта важная особенность позволила, например, в задаче анализа надежности эксплуатируемых строительных конструкций предложить новый, основанный на понятии «средней конструкционной надежности», подход к определению требуемого уровня достоверности [9].

Список использованных источников

1. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения : ГОСТ 27.301-95. – Взамен ГОСТ 27.410-87; введ. 01.01.1997. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1996. – 19 с.
2. David, H.A. Order statistics, 2nd ed. – John Wiley & Sons, New York, 1981. – 360 p.
3. Робастность в статистике. Подход на основе функций влияния: пер. с англ. / Ф.Хампель, [и др.]. – М.: Мир, 1989. – 512 с.
4. Микро-ЭВМ в информационно-измерительных системах / С.М.Переверткин, [и др.]. – М.: Машиностроение, 1987. – 248 с.
5. Робастные методы статистического анализа навигационной информации / ред.: А.К.Крытова. – Ленинград: ЦНИИ «Румб», 1985. – 205 с. – (Отраслевая система НТИ).
6. Тур, В.В. Нормирование снеговых нагрузок для территории Республики Беларусь / В.В.Тур, [и др.] // Строительная наука и техника. – 2008, № 2 (17). – С. 27-45.
7. Тур, В.В. Новый критерий для оценивания прочности бетона в условиях ограниченной выборки результатов испытаний / В.В.Тур, С.С.Дереченник // Строительство и реконструкция. – 2016, № 6 (68). – С. 71-84.
8. Tur, V.V. Assessment of the Concrete Compressive Strength in Existing Structures Based on Core Test Results / V.V.Tur, S.S.Derechennik // Solid State Phenomena. – 2018. – Vol. 272. – P. 238-243.
9. Tur, V.V. Non-Parametric Evaluation of the Characteristic In-Situ Concrete Compressive Strength of Concrete / V.V.Tur, S.S.Derechennik // Journal of Building Engineering 27 (2020) 100938. – P. 1-11.

УДК 621.382.2:[621.315.592.3+620.192.63]

УПРАВЛЕНИЕ ДЕФЕКТНОСТЬЮ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР ШУМОВЫХ ДИОДОВ

В.В. Буслюк¹, В.А. Емельянов², С.С. Дереченник¹

¹ Брестский государственный технический университет,
Брест, Беларусь, b_viktor@tut.by, cm@bstu.by

² ОАО «Интеграл», Минск, Беларусь, emeljanov@bk.ru

The types of defects in noise diode (ND) structures have been experimentally established, which mainly affect their noise properties. The determined 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. 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, followed by annealing the structures. It has been shown that annealing of ND, combined with sealing 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.

Современный уровень развития систем защиты информации характеризуется постоянным совершенствованием технических методов и программных алгоритмов и не представляется без применения источников физического шума для аппаратно-программных средств формирования случайных числовых последовательностей (СПЧ). СПЧ используются в криптографии, а также находят применение в бурно развивающемся игровой индустрии (игровые автоматы, компьютерные игры, онлайн-казино). Состоятельность СЧП, а значит и случайность результата игры или криптостойкость системы определяется, в том числе, энтропией сигнала. Таким образом, для всех этих задач качество физического источника шума имеет определяющее значение.

Используемые в таких системах твердотельные приборы, в частности, кремниевые шумовые диоды (ШД), должны обеспечивать получение шумового сигнала, оптимального по амплитудным, частотным и статистическим характеристикам. 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 [1]. Поэтому актуальными представляются исследования методов управления дефектностью высоколегированных кремниевых структур и разработка на этой основе способов управления уровнем структурных дефектов этих структур для улучшения электрических и статистических свойств ШД.

Объектом исследования выбраны высоколегированные кремниевые слои, *p-n*-переходы и структуры ШД (диодов-генераторов шума ND102–ND201 и шумовых модулей, разработанных на их основе).

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 (0,015–0,005 Ом·см) удельное сопротивление сильнолегированных ($N_A \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $N_D \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$) слоев. Основу структуры образует подложка типа КДБ, в которую последовательно проводятся две селективные диффузии фосфора для формирования *p-n*-переходов: кольцевого (защитного) глубиной 6–8 мкм с напряжением пробоя 12 В, и центрального (рабочего) глубиной 1–2 мкм с напряжением пробоя около 9 В. К рабочей области формируется планарный пленочный контакт Si-V/Ag. Особенности технологии формирования исследуемой структуры являются: длительные высокотемпературные (1050°C и 900°C) воздействия при диффузии, низкотемпературное (320°C) напыление пленки планарного контакта, среднетемпературное (450...600°C) воздействие при герметизации кристалла в корпус.

В ходе исследований установлены основные технологические операции, преимущественно влияющие на уровень дефектности структур, которые представлены на рисунке 1. Выполнено моделирование диффузии для основного и охранный p - n -переходов, а также экспериментальные исследования поверхностной плотности дислокаций в подложке, температурных зависимостей электрических характеристик p - n -перехода и параметров шумового сигнала диода в различных токовых режимах [2, 3], в ходе которых установлена зависимость электрофизических параметров от дефектности структур.

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

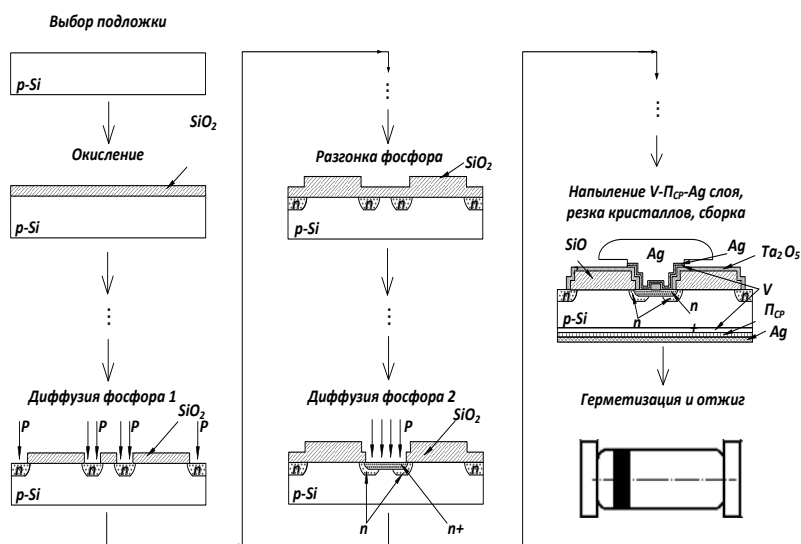


Рисунок 1 – Основные технологические операции, преимущественно влияющие на уровень дефектности структур

Низкое удельное сопротивление кремниевых подложек обусловлено высокой концентрацией легирующих примесей, что определяет существование дислокаций с поверхностной плотностью до 100 см^{-2} . На основе анализа ВФХ и ВАХ в режимах прямого и обратного включения, при положительных и отрицательных температурах, с учетом масс-спектров вторичных ионов, установлены виды дефектов в структуре ШД, преимущественно влияющих на их шумовые свойства. Для кремниевых ШД с цилиндрическими p - n -переходами малого (около 15 мкм) диаметра на подложках p -типа с ориентацией (111) и удельным электрическим сопротивлением $0,03 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (ШД ND102–ND104) и $0,0035 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (ШД ND201), энергии активации дефектов лежат в интервале $(0,45 \pm 0,03) \text{ эВ}$. Эти значения энергии позволяют идентифицировать наличие фоновых технологических примесей меди и железа, ионизация которых, в том числе, приводит к возникновению микроплазменного шума [2, 3]. Равномерное и устойчивое распределение технологических примесей по объему p - n -перехода кристалла ШД является необходимым условием квазистационарности шума.

В связи с этим 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) в азотной среде 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 10–100 мкм с шагом в 1,5...5 раз большим диаметра, с последующей делокализацией дислокационной структуры в активную область при температуре 1200°C 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].

Для стабилизации достигнутого уровня дефектов разработана совмещенная технология герметизации и отжига готовых полупроводниковых структур и кристаллов ШД. Схема совмещения герметизации и отжига диодов представлена на рисунке 2. Технологический маршрут изготовления шумового диода включает три стадии: нагрев до температуры 600°C, изотермическую стадию и охлаждение до температуры 250°C с общим временем герметизации 170–200 мин, обеспечивающий совмещенный отжиг высоко-легированной структуры диода при температуре 450–600°C в течение (80±3) мин с нагревом со скоростью 4–7°C/мин, изотермической стадией при температуре (598±2)°C в течение (19±1) мин и охлаждением со скоростью 3,8–5,0°C/мин.



Рисунок 2 – Схема совмещения герметизации и отжига ШД

В сильнолегированных структурах при отжиге в диапазоне температур 450–600°C, как известно, 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 . Нами показано, что отжиг кристаллов и готовых ШД на финишных операциях в предложенном температурно-временном режиме 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 такого 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.

Предложенная технология апробирована и внедрена в производство ШД. 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, так и для аналого-цифровых шумовых модулей [7].

Список использованных источников

1. Грехов И. В., Сержкин Ю. Н. Лавинный пробой p - n -перехода в полупроводниках. – Л., 1980.
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. Filipyenyay, 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.
7. 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.

УДК 519.6

РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СКЛАДОМ

С.Ф. Лебедь

Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь

Reliability theory establishes the patterns of failures and restoration of the system and its elements, considers the influence of external and internal influences on the processes in systems, creates the basis for calculating reliability and predicting failures, seeks ways to improve reliability in the design and manufacture of systems and elements, as well as ways to maintain reliability during operation.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность функционирования технических систем (ТС) в значительной степени зависит от надежности как отдельных устройств, входящих в системы, так и элементов, обеспечивающих взаимодействие между этими устройствами.

Следует отметить, что, несмотря на значительные усилия в области повышения надежности ТС, уровень их надежности остается недостаточно высоким и не удовлетворяет все возрастающим требованиям производства. Недостаточ-