

МЕТОДЫ ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОМПЕНСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ ШУМОВЫХ ДИОДОВ

О. О. ЛАТИЙ¹, канд. техн. наук В. В. БУСЛЮК^{2,1}, канд. техн. наук, доц. С. С. ДЕРЕЧЕННИК²,
д-р техн. наук, проф., член-корр. НАН Беларуси В. А. ЕМЕЛЬЯНОВ³,
канд. техн. наук О. В. КОЧЕРГИНА⁴, д-р физ.-мат. наук, проф. В. Б. ОДЖАЕВ⁵,
канд. физ.-мат. наук, доц. В. С. ПРОСОЛОВИЧ⁵, канд. физ.-мат. наук Ю. Н. ЯНКОВСКИЙ⁵

¹(ОАО «Цветотрон», Брест)

²(Брестский государственный технический университет)

³(ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск)

⁴(Белорусская государственная академия связи, Минск)

⁵(Белорусский государственный университет, Минск)

Исследованы методы компенсации изменений электрических характеристик дискретных полупроводниковых шумовых диодов, а также выпрямляющих контактов р-п-переходов и переходов металл-полупроводник в условиях изменяющейся температуры. На основании экспериментальных исследований электрофизических характеристик диодов-генераторов шума и проведенного моделирования структуры, состоящей из диода-генератора шума, включенного в обратном направлении, и компенсирующего диода, включенного в прямом направлении, предложен метод стабилизации напряжения микроплазменного пробоя шумовых диодов серии ND производства холдинга «Интеграл», Республика Беларусь. Установлено, что для данных шумовых диодов зависимость напряжения микроплазменного пробоя от температуры в диапазоне 24–125 °С имеет характер, близкий к линейному. Это позволяет произвести температурную компенсацию напряжения пробоя шумового диода, последовательно соединив его с прямо включенным диодом Шоттки, что ранее не практиковалось в связи с узким диапазоном токов микроплазменного пробоя. Показано, что степень термокомпенсации, характеризующаяся величиной углового коэффициента линейной аппроксимации зависимости напряжения пробоя от температуры, зависит от электрофизических параметров диода-генератора шума и компенсирующего диода. При термокомпенсации напряжения пробоя дискретным диодом Шоттки получено снижение граничной частоты шума при нормальных климатических условиях на 40 %, однако при температуре 125 °С граничная частота термокомпенсированного шумового диода увеличивается более чем в 2 раза и достигает значений, характерных для диодов-генераторов шума ND103L. Результаты исследований позволяют сделать вывод о наличии конструктивно-технологических возможностей расширения температурного диапазона эксплуатации шумовых диодов в режиме микроплазменного пробоя.

Ключевые слова: диоды-генераторы шума, температурная компенсация, напряжение пробоя, спектральная плотность напряжения шума, граничная частота шума, диапазон рабочих температур.

Введение. Под шумом обычно понимают беспорядочные колебания различной физической природы, отличающиеся сложностью временной и спектральной структуры. В радиоэлектронике шумом принято считать любые нежелательные возмущения (флуктуации), сопровождающие полезный сигнал и образующие с ним аддитивную смесь. Такие шумы нежелательны для большинства электронных устройств. Однако в ряде случаев целенаправленно сгенерированный шум может придать электронным устройствам новые функциональные свойства. Примером является шум обратносмещенного р-п-перехода (стабилитрона, биполярного транзистора), который используется в аппаратно-программных системах защиты информации и метрологии [1]. Для этих целей выпускаются специально разработанные шумовые диоды (ШД), использующие эффект лавинного пробоя и обладающие необходимыми предельно допустимыми и эксплуатационными параметрами.

Однако для успешного функционирования таких систем в широком диапазоне температур необходимо проектировать дополнительные термостабилизирующие схемы и устройства, так как сами ШД стабильно генерируют широкополосный шум с приемлемым коэффициентом корреляции лишь в узком диапазоне температур. Так, генераторы шума NC103 (США) рассчитаны на работу в диапазоне температур от 0 до 55 °С [1]. Диоды-генераторы шума серии ND, производимые предприятиями холдинга «ИНТЕГРАЛ» (последние разработанные типы) и большинство их российских аналогов, имеют рабочий температурный диапазон от минус 60 до +70 °С^{1, 2}. Такие температурные диапазоны значительно ниже верхней границы

¹ Диод 2Г401В характеристики, параметры, схема, описание [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://eandc.ru/pdf/diod/2g401_kg401.pdf (дата обращения: 04.04.2025).

² Каталог: микроэлектронные компоненты, средства отображения информации, изделия электронной техники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.integral.by/sites/default/files/catalog_2017.compressed.pdf (дата обращения: 04.04.2025).

рабочих температур большинства кремниевых полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, у которых она составляет 125 °С.

Физическая природа температурных ограничений шумовых диодов заключается в изменении значения напряжения лавинного пробоя обратносмещенного p - n -перехода при изменении температуры. Для большинства полупроводниковых приборов (выпрямительных диодов, биполярных транзисторов, стабилитронов) данный эффект зачастую не играет существенной роли, а там, где это необходимо, минимизируется с помощью дополнительных устройств. Для шумовых диодов изменение напряжения пробоя критично и приводит к значительному изменению постоянного напряжения пробоя, спектральной плотности напряжения шума (СПНШ), а также температурного коэффициента СПНШ.

Следует упомянуть, что компания Noise Com (США) производит серию шумовых диодов (диапазон ОВЧ: NC 200-VHF type), работающих при температурах от минус 55 до +125 °С³. Методы обеспечения расширенного диапазона эксплуатации таких ШД изготовителем не комментируются.

Поскольку температура оказывает существенное влияние на вольт-амперные характеристики (ВАХ) ШД и, как следствие, на его шумовые параметры и работу устройств, в которых они будут применяться, то актуальной задачей является компенсация температурного воздействия на характеристики p - n -перехода ШД. Влияние температуры оценивается температурным коэффициентом напряжения (ТКН) – параметром, характеризующим изменение прямого напряжения для данной величины прямого тока при изменении температуры на 1 °С. Проблема температурной компенсации электрических параметров (ТКЭП) полупроводниковых приборов ранее была решена для термокомпенсированных стабилитронов, полевых транзисторов, а также функциональных устройств. Однако для диодов-генераторов шума этот вопрос до настоящего времени не изучался. Целью работы являлась разработка методов ТКЭП для шумовых диодов, выполненных на пластинах монокристаллического кремния в составе единой структуры, что ранее не практиковалось в связи с узким диапазоном токов микроплазменного пробоя.

Методика проведения экспериментов. Измерения вольт-амперных характеристик шумовых диодов с целью установления влияния термокомпенсирующего диода на электрофизические параметры приборов проводились с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-3 и измерителя параметров шумовых диодов ИШ-1, а также на автоматизированном комплексе измерения электрических параметров шумовых диодов АКВД (ОАО «Планар», Республика Беларусь) в интервале положительных температур от 24 до 125 °С. Выбор данного температурного диапазона обусловлен задачей исследования: изучением возможности увеличения верхней границы рабочих температур ШД. Соединение выводов ШД и термокомпенсирующих диодов производилось методом пайки.

Моделирование структуры, включающей диод-генератор шума, включенный в обратном направлении, и компенсирующий диод, включенный в прямом направлении, проводилось в COMSOL Multiphysics. При расчетах использовался подмодуль «Полупроводники» модуля «Электротехника». Подмодуль основан на уравнениях диффузии и дрейфа с использованием изотермических или не изотермических моделей переноса.

Исследования проводились с использованием диодов-генераторов шума марок ND102L, ND103L и ND104L. В качестве компенсирующих диодов были выбраны выпрямительные диоды Шоттки 1N60 и 1N5819, обеспечивающие рабочие температуры до 125 °С, различающиеся рабочим током и временем обратного восстановления (для 1N60 – $1 \cdot 10^{-9}$ с).

Экспериментальные результаты и методы моделирования. Шумовые диоды изготавливаются, как правило, на сильнолегированном кремнии, выращенном по методу Чохральского. Они имеют определенный уровень естественных или созданных специально неоднородностей легирования и дефектов структуры [2]. Данные диоды проектируются таким образом, чтобы использовать преимущественно ударную ионизацию носителей заряда и лавинный пробой p - n -перехода на начальном участке пробоя ВАХ. Создаваемые ими шумы имеют микроплазменный характер [3].

Напряжение пробоя $U_{пр}$ несимметричного p - n -перехода определяется формулой [4]

$$U_{пр} = \frac{E_m W}{2} = \frac{\varepsilon_s E_m^2}{2q} (N_B)^{-1},$$

где N_B – концентрация ионизированной примеси в слаболегированной области;

E_m – максимальное значение электрического поля;

ε_s – диэлектрическая проницаемость полупроводника.

³ Noisecom Catalog [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.noisecom.com/resource-library?brand=Noisecom&go=catalog> (дата обращения: 04.04.2025).

Для кремния справедлива приближенная универсальная формула напряжения пробоя [4]

$$U_{пр} \cong 60(E_g / 1,1)^{3/2} (N_B / 10^{16})^{-3/4} [B],$$

где E_g – ширина запрещенной зоны при комнатной температуре.

Из приведенных выражений следует, что величина напряжения пробоя зависит как от ширины запрещенной зоны полупроводника, так и от концентрации легирующих примесей. Однако с повышением температуры возрастает амплитуда колебаний атомов кристаллической решетки, что обуславливает возрастание эффективности рассеяния носителей заряда на фононах. Вследствие этого зависимость напряжения лавинного пробоя от температуры определяется, прежде всего, температурной зависимостью длины свободного пробега носителей заряда. При рассеянии носителей на колебаниях решетки их подвижность снижается с ростом температуры. Следовательно, для того чтобы носитель при меньшей длине свободного пробега приобрел энергию, достаточную для ионизации валентных связей, поля в переходе должны иметь большую величину. В результате с ростом температуры увеличивается электрическое поле, необходимое для проявления эффекта ударной ионизации (E_m), и, соответственно, напряжение электрического пробоя p - n -перехода.

Ранее было установлено [5], что прямая ветвь ВАХ шумовых диодов при повышении температуры смещается в сторону оси токов. Это обусловлено тем, что ток в прямом направлении определяется его диффузионной составляющей, зависящей как от величины концентрации неосновных носителей заряда, так и от температурного изменения ширины запрещенной зоны. При больших прямых токах существенное влияние на их значение также начинает оказывать сопротивление базы, которое возрастает с повышением температуры вследствие снижения подвижности свободных носителей заряда. Это приводит к отклонению ВАХ в сторону больших напряжений. Следовательно, при малых прямых токах ВАХ смещается с ростом температуры влево, а при больших токах (где влияние базы сильнее) – вправо.

Кроме того, при возрастании температуры увеличивается скорость тепловой генерации электронно-дырочных пар во всех областях p - n -перехода. Это приводит к резкому возрастанию концентрации неосновных носителей в p - и n -областях перехода и, следовательно, к увеличению тока насыщения и ухудшению выпрямляющих свойств диода. Таким образом, при изменении температуры результирующая ВАХ p - n -перехода при прямом смещении для малых и больших токов изменяется разнонаправленно. Измерение ВАХ при обратном включении диодов показало [5], что для ШД с увеличением температуры напряжение пробоя возрастает. Это обусловлено уменьшением энергии, которую носитель заряда может приобрести в электрическом поле между двумя столкновениями вследствие температурного уменьшения длины свободного пробега [6]. С повышением температуры подвижность неосновных носителей в области p - n -перехода уменьшается, в связи с чем для поддержания ударной ионизации требуется повышение напряженности электрического поля.

Диоды генераторы шума марок ND102L, ND103L и ND104L в силу различного значения удельного сопротивления исходных подложек монокристаллического кремния, на которых изготавливаются приборные структуры, имеют различные по величине напряжения пробоя, поэтому для сравнения их характеристик целесообразно использовать понятие перенапряжения, определяемое как

$$\Delta U = U_{пит} - U_{пр},$$

где $U_{пит}$ – напряжение питания, подаваемое на диод.

Проведенные исследования зависимости средней амплитуды шумовых импульсов ШД от напряжения обратного смещения подтвердили, что увеличение перенапряжения сопровождается ростом ее значения. Установлено, что данные зависимости близки к линейным [7].

Ранее было показано [8], что увеличение температуры приводит к росту последовательного сопротивления ШД. Данная зависимость последовательного сопротивления от температуры $R(T)$ также носит линейный характер. Коэффициент линейности зависимости $R(T)$ определяется как $k = \Delta R / \Delta T$ (ΔR – изменение величины последовательного сопротивления при изменении температуры на ΔT) и составляет для ND102L, ND103L и ND104L 7,6; 1,9 и 1,0 кОм/К, соответственно. Зависимость $R(T)$ наиболее сильно проявляется для ND102L, а наименее – для ND104L. Уменьшение последовательного сопротивления с понижением температуры связано с увеличением подвижности свободных носителей заряда в базовом материале (кремнии) шумового диода.

Одним из методов обеспечения термостабильности обратной ветви ВАХ диода может быть последовательное соединение обратносмещенного p - n -перехода с положительной величиной температурного коэффициента напряжения (обратное напряжение U_R) и прямосмещенного p - n -перехода с отрицательной величиной ТКН и прямым падением напряжения U_F .

Так, принцип конструирования термокомпенсированных стабилитронов с результирующим напряжением пробоя $U = U_R + U_F$ и температурным коэффициентом напряжения стабилизации (ТКНС) заключается в обеспечении общего ТКН, близкого к нулю, что позволяет сохранить рабочее напряжение U неизменным в некотором диапазоне рабочих температур⁴. При этом

$$\text{ТКНС} = (+)\text{ТКН}_{\text{осн}} + (-)\text{ТКН}_k,$$

где $\text{ТКН}_{\text{осн}}$ – температурный коэффициент напряжения основного шумового диода, включенного в обратном направлении;

ТКН_k – температурный коэффициент компенсирующего диода, включенного в прямом направлении. Вышеуказанные соотношения могут быть выполнены при условии

$$|\text{ТКН}_{\text{осн}}| \approx |\text{ТКН}_k|.$$

У маломощных кремниевых диодов, включенных в прямом направлении, типовое значение ТКН_d приблизительно равно минус $2 \cdot 10^{-3}$ В/К⁵. Изменение напряжения лавинного пробоя в заданном диапазоне температур составит

$$\Delta U_{\text{ст}} = \text{ТКНС} \cdot \Delta T,$$

где ΔT – наибольшее отклонение от температуры, соответствующей нормальным условиям (25 °С).

С учетом принципиальной схожести физических процессов, протекающих в шумовых диодах и стабилитронах, обоснованным представляется применение описанной выше методики температурной компенсации напряжения пробоя в отношении диодов-генераторов шума. При этом необходимо учесть более узкий диапазон токов электрического пробоя шумовых диодов.

Таким образом, для модельного расчета результирующего значения напряжения пробоя параметрического стабилизатора в составе диода-генератора шума и выпрямительного p - n -перехода необходимо задать диапазон температур. Для диапазона от минус 60 до 125 °С, в котором работает большинство полупроводниковых приборов, наибольшее отклонение температуры от нормальной составит 100 °С. При этом если напряжение на диоде $U_{\text{вых}} = U_{\text{ст}} + \Delta U_{\text{ст}}$ в процессе моделирования находится в заданных пределах, то расчет закончен. Если же $U_{\text{вых}}$ выходит за допусковую зону, то следует в качестве исходных параметров использовать либо характеристики других шумовых диодов, либо включить компенсирующие диоды с другими параметрами ВАХ и ТКН_k и повторить расчет. Для шумовых диодов допустимая зона значений $U_{\text{вых}}$ определяется исходя из требуемого температурного коэффициента СПНШ при рекомендуемом техническими условиями токе 50 мкА. Кроме того, для обеспечения адекватного влияния шумовой и термокомпенсирующий диоды должны находиться в одинаковых температурных условиях.

Было проведено моделирование структуры, содержащей в одном кристалле и диод-генератор шума и термокомпенсирующий p - n -переход. В качестве исходных электрофизических параметров использовались полученные ранее для диодов-генераторов шума ND103L и ND201L зависимости прямых ветвей ВАХ, а также фактические значения увеличения напряжения открывания диодов с уменьшением температуры [8].

Расчет показал положительное действие термокомпенсирующего p - n -перехода на ТКН диода-генератора шума. Смоделированный в структуре шумового диода ND103L прямосмещенный p - n -переход полностью открывается при напряжении более 0,9 В, при этом ток составляет 50 мА. Напряжение микроплазменного пробоя ШД в этих условиях составляет 6–9 В. Изменение температуры при токах 50–100 мкА, которые ограничиваются токозадающими резисторами в цепи ШД, приводит к удовлетворительным изменениям прямого падения напряжения и смещения прямой ветви ВАХ. Следует отметить, что при высоких обратных токах (более 100 мкА) работа диода-генератора шума невозможна, т. к. микроплазменный характер пробоя прекращается и переходит в стационарный лавинный пробой p - n -перехода.

Основные этапы эволюции типовой структуры термокомпенсированного p - n -переходом ШД представлены на рисунке 1. В результате одновременного формирования n -области на планарной и обратной сторонах кристалла можно, в зависимости от подключения питания, получить включенный в обратном направлении ШД и включенный в прямом направлении выпрямляющий диод. Однако при использовании

⁴ Патент Ru 2162622 С 1. Низковольтный термокомпенсированный стабилитрон и способ его изготовления: опубл. 27.01.2001 / Скорняков С. П.

⁵ URL: https://eandc.ru/pdf/diod/2g401_kg401.pdf (дата обращения: 04.04.2025).

тонких пластин будут существенно затруднены технологические процессы окисления и диффузии, а также двустороннее гальваническое выращивание серебряных электродов.

Серийное производство однокристалльных термокомпенсированных p - n -переходом ШД будет сопряжено и с рядом других трудностей. Они заключаются в необходимости проведения двусторонней фотолитографии и легирования тонких пластин (толщиной 150–170 мкм), так как выпускаемые ШД имеют вертикальную структуру кристалла и предназначены для сборки в металлостеклянных корпусах DO-35 и SOD-80 (minimelf). Это потребует освоения новой технологии с применением нового специального технологического оборудования, а также значительно снизит процент выхода годных приборов при работе с тонкими пластинами.

Указанные выше конструкторско-технологические сложности изготовления термокомпенсирующего прямосмещенного p - n -перехода в структуре шумового диода обусловили поиск иных решений. В работе был проведен анализ применимости других приборов и методов для температурной компенсации изменений напряжения лавинного микроплазменного пробоя, применяемых для прочих полупроводниковых приборов (стабилитроны, импульсные диоды, температурная стабилизация шумового напряжения с применением внешних термодатчиков, температурная компенсация разбалансировки измерительного моста). Он показал, что наиболее перспективным является применение в качестве термокомпенсирующего элемента выпрямляющего контакта металл-полупроводник (диода Шоттки), включенного в прямом направлении.

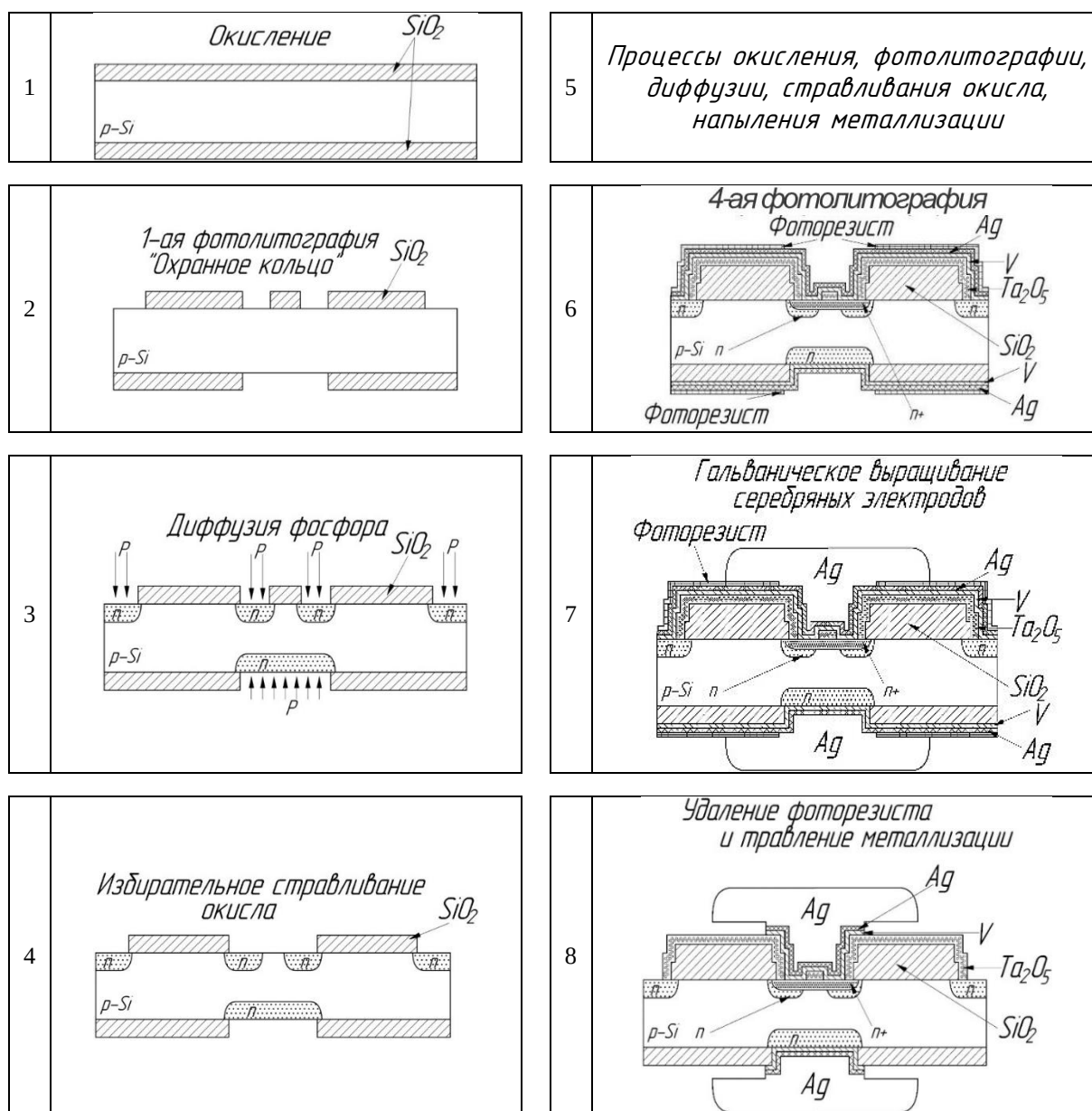


Рисунок 1. – Основные этапы эволюции типовой структуры термокомпенсированного p - n -переходом ШД

Как известно, маломощные кремниевые диоды Шоттки (ДШ) обладают отрицательным ТКН. Вольтамперная характеристика ДШ описывается выражением [7]

$$J = J_s [\exp(qV / kT) - 1],$$

где $J_s = AT^2 \exp(-q\phi_k / kT)$,

где A – постоянная Ричардсона;

ϕ_k – контактная разность потенциалов.

Таким образом, при увеличении температуры как прямая, так и обратная ветви ВАХ диодов Шоттки смещаются к оси токов, т. е. имеет место отрицательный температурный коэффициент напряжения. Напряжение туннельного пробоя определяется выражением

$$U_{пр} = \epsilon\epsilon_0 \cdot E_{кр}^2 / 2q \cdot N_{прим} - \phi_k,$$

где $E_{кр}$ – величина критической напряженности электрического поля, необходимая для включения туннельного пробоя;

ϵ – диэлектрическая проницаемость среды;

ϵ_0 – диэлектрическая постоянная;

$N_{прим}$ – концентрация основной легирующей примеси в полупроводнике.

Температурная зависимость напряжения туннельного пробоя определяется температурной зависимостью ширины области обеднения. С повышением температуры увеличивается энергия носителей заряда, соответственно, растет и вероятность туннельного перехода. Кроме того, при увеличении температуры уменьшаются ширина запрещенной зоны E_g , а также ширина барьера и контактная разность потенциалов. Это дополнительно увеличивает вероятность туннелирования, в результате чего происходит уменьшение напряжения пробоя, что обуславливает отрицательное значение $TКУ_{пр}$ при туннельном механизме.

Кроме того, ДШ характеризуются сравнительно малым падением напряжения при прямом включении, меньшими прямыми рабочими токами и высокими граничными частотами в силу отсутствия накопления заряда в базе диода [7]. Низкие пробивные напряжения маломощных ДШ при обратном включении не являются в данном случае их существенным недостатком, так как они не превышают напряжение пробоя шумовых диодов. Однако генерируемый при прямом включении ДШ рекомбинационный шум носителей заряда [9] может влиять на общий шум термокомпенсированного ШД как суперпозиция шумов двух p - n -переходов.

Измерения шумовых параметров производились на 30 диодах-генераторах шума ND103L (ОАО «Цветотрон», Республика Беларусь). В качестве компенсирующих диодов были выбраны выпрямительные диоды Шоттки 1N60 и 1N5819, обеспечивающие максимальные рабочие температуры до 125 °С и различающиеся рабочим током и временем обратного восстановления (для 1N60 – $1 \cdot 10^{-9}$ с). В таблице приведены средние значения шумовых параметров диодов-генераторов шума ND103L, измеренные при пяти положительных значениях температуры. Также представлены средние значения этих же шумовых параметров, но с дополнительно включенными последовательно компенсирующими диодами Шоттки (1N60 и 1N5819).

Таблица. – Средние значения шумовых параметров диодов

Шумовые параметры, ед. измерения	Типы ШД	Норма		Температура, °С				
		+25 °С	+70 °С	+24	+50	+70	+100	+125
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{эфф}$, мВ,	ND103L	не нормируется	не нормируется	115,30	99,57	85,76	64,44	49,94
	ND103L+ 1N5819	—	—	98,88	85,86	72,20	52,51	49,94
	ND103L+ 1N60	—	—	98,6	85,61	70,00	48,58	36,42
СПНШ, мкВ/(Гц) ^{1/2}	ND103L	не менее 30,00	не менее 20,00	62,21	49,39	40,00	26,72	18,42
	ND103L+ 1N5819	—	—	57,33	44,74	34,36	22,05	15,42
	ND103L+ 1N60	—	—	59,32	46,60	34,53	20,95	14,28
$F_{гр}$, МГц	ND103L	не менее 1,00	не менее 1,00	5,62	4,50	5,15	6,85	8,32
	ND103L+ 1N5819	—	—	4,50	5,37	6,06	7,13	9,90
	ND103L+ 1N60	—	—	3,38	4,05	5,16	6,59	8,12

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Неравномерность, Дб	ND103L	не более 3,00	не нормируется	1,70	1,74	1,68	1,67	1,68
	ND103L+1N5819	—	—	1,86	1,86	1,82	1,87	1,85
	ND103L+1N60	—	—	1,77	1,80	1,82	1,84	1,84
Напряжение пробоя, В	ND103L	не менее 6 и не более 9	не нормируется	8,80	8,94	9,12	9,17	9,26
	ND103L+1N5819	—	—	8,94	9,05	9,06	9,13	9,30
	ND103L+1N60	—	—	9,11	9,17	9,26	9,28	9,39

Из анализа данных, приведенных в таблице, можно заключить, что исследуемые шумовые параметры во всех случаях имеют зависимость от температуры, близкую к линейной. В связи с тем, что термокомпенсированные диоды (например, ND103L + 1N60) имеют ненулевые сопротивления базовой области и омических контактов, в том числе соединительных проводов, степень температурной компенсации может быть оценена по угловым коэффициентам усредненных прямых. Чем ближе к нулю модульное значение углового коэффициента $|k|$ в уравнении аппроксимированной прямой $y = kx + b$, тем меньше зависимость шумового параметра от температуры. В данном уравнении нами было принято напряжение пробоя в качестве функции y , а в качестве аргумента x – температура.

Установлено, что при прямом включении ДШ изменяется граничная частота генерируемого шума термокомпенсированного ШД (ND103L + 1N60), которая снижается при 24 °C на ~40 %. Однако при температуре 125 °C данная характеристика термокомпенсированного ШД увеличивается более чем в 2 раза и достигает значений, характерных для ШД ND103L, при этом спектральная плотность шума термокомпенсированного ШД закономерно снижается.

На рисунке 2 представлены зависимости от температуры напряжения пробоя ШД, термостабилизированного диодом Шоттки 1N60, и фактические значения такой зависимости для шумового диода ND103L, а также кривые линейной аппроксимации.

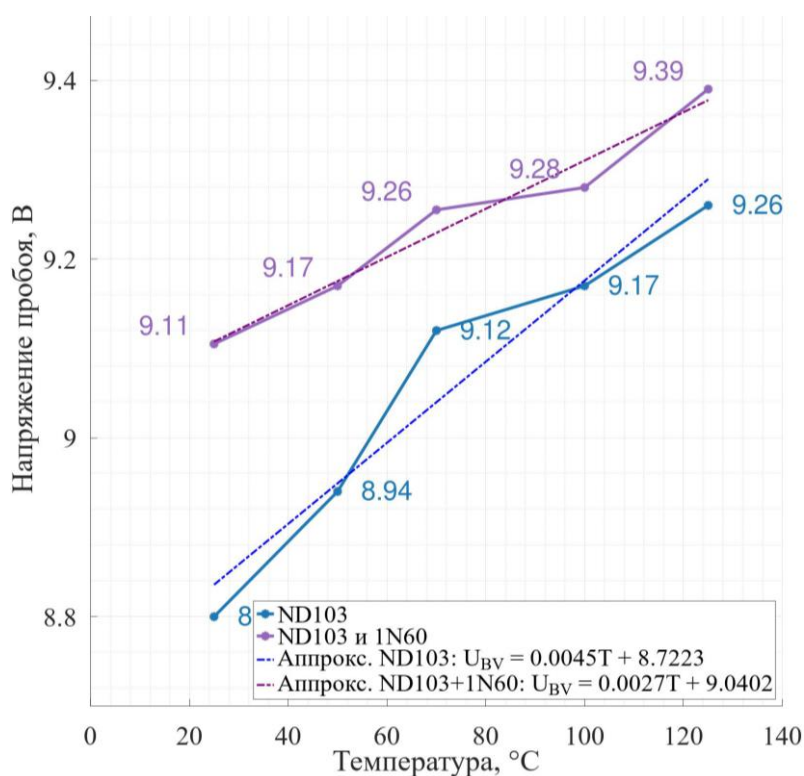


Рисунок 2. – Зависимость напряжения пробоя шумового диода ND103L, термостабилизированного ДШ 1N60, и шумового диода ND103L от температуры

Аналогичные зависимости для ШД, термостабилизированного диодом Шоттки 1N5819, и для шумового диода ND103L представлены на рисунке 3. Как следует из приведенных графиков зависимостей, угловой коэффициент $|k|$ составляет для ШД ND103L 0,0045 В/К при $b = 8,72$ В; для термокомпенсированных ND103L + 1N60 ($b = 9,04$ В) и ND103L + 1N5819 ($b = 8,87$ В) – соответственно 0,0027 В/К и 0,0033 В/К. Таким образом, последовательное соединение ДШ и ШД позволяет произвести температурную компенсацию напряжения пробоя ШД. Степень компенсации выше у пары шумовой диод + диод Шоттки (ND103L + 1N60). Это объясняется меньшим падением прямого напряжения на 1N60 при рабочем токе ШД, а также большей температурной зависимостью прямой ветви его ВАХ по сравнению с 1N5819.

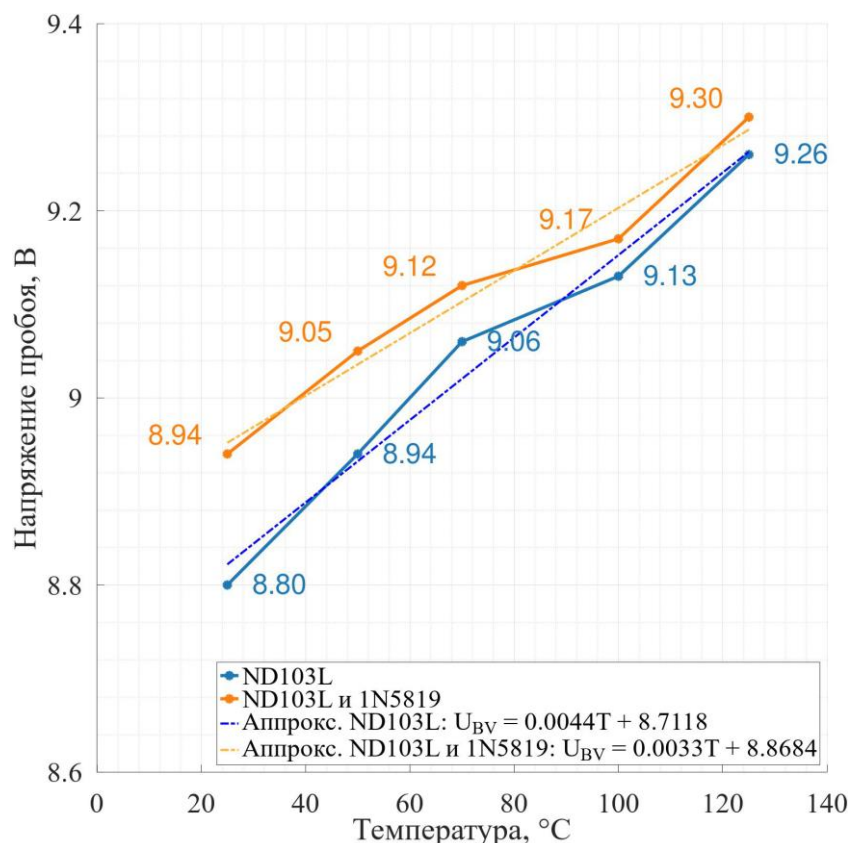


Рисунок 3. – Зависимость напряжения пробоя шумового диода ND103L, термостабилизированного ДШ 1N5819, и шумового диода ND103L от температуры

Очевидно, что величина степени термокомпенсации определяется электрофизическими параметрами компенсирующего диода.

Результаты моделирования температурной зависимости напряжения пробоя ШД с использованием Миско-Сар и линейной аппроксимации представлены на рисунке 4. Наблюдается достаточно хорошее соответствие экспериментальных и расчетных результатов: результаты моделирования, формы кривых для модели ND103L + 1N5819 и соответствующей ей линейной аппроксимации практически совпадают.

Для количественной оценки схожести кривых напряжения пробоя при разной температуре проведен сопоставительный анализ динамики кривых напряжения пробоя при использовании расчета среднеквадратичных отклонений. Анализ охватывал нормализованные значения X_{norm} экспериментальных и модельных данных, приведенных к единой шкале в температурном диапазоне 25–125 °C (рисунок 5).

Нормализация данных была выполнена методом масштабирования относительно минимального и максимального значений, что позволило привести все величины к диапазону $[0; 1]$. Нормализация осуществлялась путем вычитания из каждого экспериментального значения массива X минимальной величины X_{min} с последующим делением полученного результата на разницу между максимальной X_{max} и минимальной величинами:

$$X_{norm} = (X - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}).$$

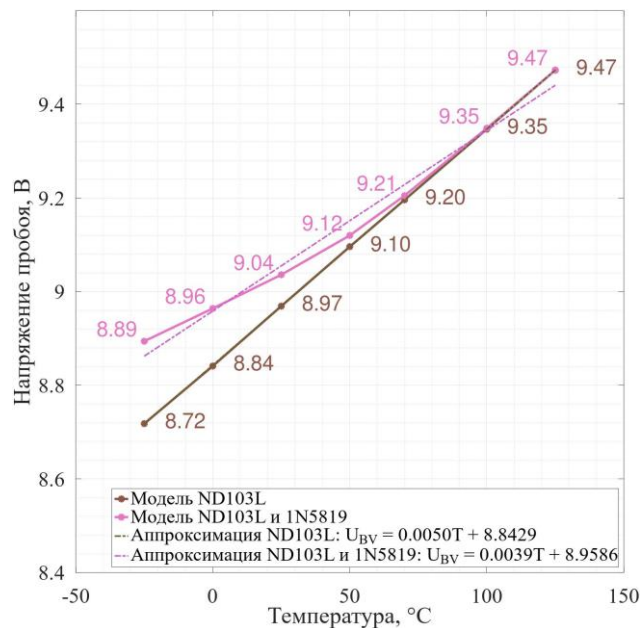


Рисунок 4. – Моделирование зависимости напряжения пробоя ШД от температуры

Такой подход был применен для облегчения сравнения данных, исключения зависимости от конкретных значений напряжения пробоя, а также для обеспечения более интуитивного представления данных в едином масштабе. Нормализация от 0 до 1 также способствует улучшению интерпретации и визуализации данных, особенно в контексте анализа и обработки сигналов, где единый масштаб упрощает выявление закономерностей и аномалий. Для пары ND103L и его модели (рисунок 5, а) величина среднеквадратичной ошибки (RMSE) составила 0,0583, что свидетельствует о минимальных расхождениях. В случае кросс-валидации ND103L с диодом 1N5819 и их моделью (рисунок 5, б) значение RMSE составляет 0,0796, что также свидетельствует о минимальных расхождениях. Однако, как сказано ранее, более предпочтительной для проведения термокомпенсации температурного изменения напряжения пробоя является пара ND103L + 1N60. На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что результаты сравнительного анализа демонстрируют высокую степень соответствия между экспериментальными данными и расчетными моделями.

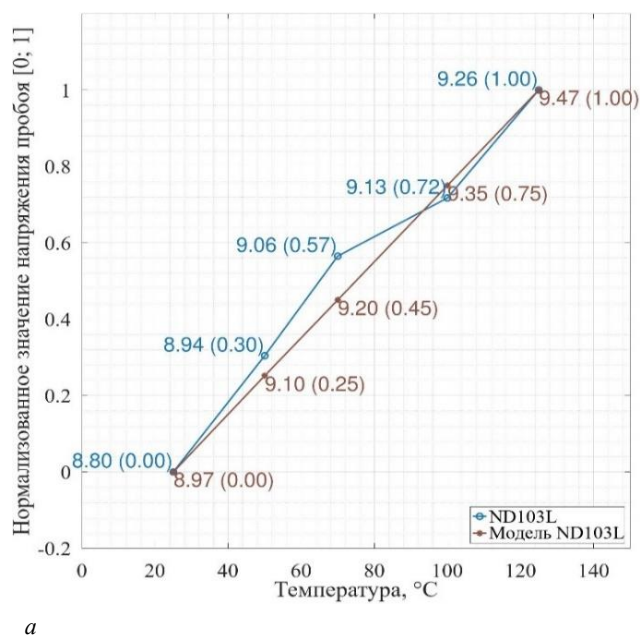
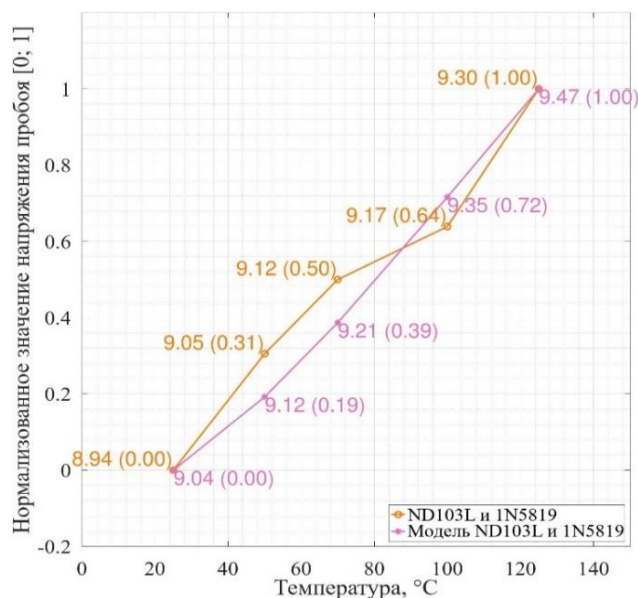


Рисунок 5. – Кривые зависимостей нормализованного напряжения пробоя шумового диода ND103L и его модели (а)
(начало)



б

Рисунок 5. – Кривые зависимостей нормализованного напряжения пробоя шумового диода ND103L, термостабилизированного ДШ 1N5819 и модели шумового диода ND103L, термостабилизированного ДШ 1N5819 (б) (окончание)

Также одним из логичных подходов к температурной компенсации напряжения пробоя шумового диода является снижение напряжения его электрического пробоя до 4-5 В, достигаемое за счет более высокой степени легирования. При этом будет обеспечиваться одновременное протекание лавинного и туннельного тока, которые имеют противоположные по знаку, но близкие по значению КТН. Такое изменение конструкции и технологии теоретически возможно, однако при этом получить серийный сильнолегированный кремний на пределе растворимости донорных или акцепторных примесей с контролируемым уровнем дефектности весьма сложная задача, требующая значительных затрат при ограниченной партии производства соответствующих приборов. К тому же снижение пробивного напряжения сопровождается включением механизма туннельного пробоя, что приводит к значительному снижению амплитуды шумового сигнала и ухудшению его спектральных и эксплуатационных характеристик. Это, в свою очередь, существенно повлияет на потребительские свойства шумовых диодов и потребует доработки радиоэлектронных схем потребителей с последующими испытаниями устройств для подтверждения их качества. В конечном итоге это может привести к снижению потребности в шумовых диодах, особенно в области защиты информации.

Закключение. На основе экспериментальных исследований в сочетании с моделированием вольт-амперных характеристик диодов-генераторов шума показана принципиальная возможность компенсации температурных изменений напряжения пробоя шумовых диодов серии ND и расширения диапазона их рабочих температур. Наиболее перспективным методом является последовательное соединение обратно включенного диода-генератора шума и прямо включенного диода Шоттки. Такое схемотехническое решение может использоваться в качестве необходимого условия расширения диапазона рабочих температур до 125 °C. Установлено, что шумовые параметры во всех случаях (как для одиночных диодов-генераторов шума, так и для пары шумовой диод + диод Шоттки) имеют зависимость от температуры, близкую к линейной. Степень температурной компенсации напряжения пробоя оценивалась по угловым коэффициентам усредненных прямых зависимости напряжения пробоя от температуры. Полученные значения составляют: для ND103L – 0,0045 В/К, а для термокомпенсированных пар ND103L + 1N60 и ND103L + 1N5819 – соответственно 0,0027 В/К и 0,0033 В/К. Это свидетельствует о существенно меньшем влиянии изменения температуры на величину напряжения пробоя диодов-генераторов шума при последовательном их соединении с прямосмещенным диодом Шоттки. Особое внимание при проектировании термокомпенсированных шумовых диодов (как в гибридном шумовом модуле, так и в монолитной интегральной структуре) следует уделить учету влияния выпрямляющего контакта металл–полупроводник и обеспечению минимального падения напряжения на прямой ветви диодов Шоттки при работающих в режиме пробоя диодах-генераторах шума.

Работа выполнена в рамках задания 3.11.3 Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Фотоника и электроника для инноваций», подпрограмма «Микро- и нанoeлектроника».

ЛИТЕРАТУРА

1. Винокуров С. А., Кочемасов В. Н., Сафин А. Р. Генераторы шума (обзор) // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. – Т. 26, № 4. – С. 6–32. – DOI: [10.32603/1993-8985-2023-26-4-6-32](https://doi.org/10.32603/1993-8985-2023-26-4-6-32).
2. Технологические аспекты производства изделий субмикронной электроники / В. В. Буслюк, А. Э. Видрицкий, Д. А. Голосов и др.; под ред. В. Л. Ланина. – Минск: «Бестпринт», 2024. – 269 с.
3. Грехов И. В., Серезжин Ю. Н. Лавинный пробой р-п-перехода в полупроводниках // Л.: Энергия, 1980. – 152 с.
4. Semiconductor Devices: Physics and Technology / ed.: S. M. Sze, M.-K. Lee. – 3th ed. – Hoboken, NJ: Wiley, 2012. – 592 p.
5. Электрофизические параметры диодов генераторов широкополосного шума / В. Б. Оджаев, А. К. Панфиленко и др. // Микроэлектроника. – 2020. – Т. 49, № 4. – С. 315–320.
6. Электрофизические параметры генераторных диодов для создания широкополосного шума / В. В. Буслюк, И. Ю. Нерода, А. Н. Петлицкий // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2017. – № 1. – С. 95–99.
7. Амплитудные характеристики шумовых диодов / А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, В. В. Буслюк и др. // Прикладная физика. – 2024. – № 3. – С. 51–57. – DOI: [10.51368/1996-0948-2024-3-51-57](https://doi.org/10.51368/1996-0948-2024-3-51-57).
8. On the Temperature Characteristics of Noise Diodes / A. O. Zenevich, O. V. Kochergina, V. V. Buslyuk // Semiconductors. – 2024. – Vol. 58, iss. 13. – P. 1128–1131. – DOI: [10.1134/S1063782624700167](https://doi.org/10.1134/S1063782624700167).
9. Божков В. Г. Контакты металл-полупроводник: физика и модели. – Томск: Издательский Дом Томского гос. ун-та, 2016. – 528 с.

Поступила 15.07.2025

**METHODS OF TEMPERATURE VOLTAGE COMPENSATION
ELECTRICAL BREAKDOWN OF NOISE DIODES**

**O. LATIY¹, V. BUSLYUK^{2,1}, S. DERECHENNIK², V. YEMELYANOV³, O. KOCHERGINA⁴,
V. ODZHAEV⁵, V. PROSOLOVICH⁵, Yu. YANKOVSKI⁵**

¹(“Tsvetotron” Joint Stock Company, Brest)

²(Brest State Technical University)

³(“INTEGRAL” Joint Stock Company, Minsk)

⁴(Belarusian State Academy of Communications, Minsk)

⁵(Belarusian State University, Minsk)

Methods for compensating for changes in the electrical characteristics of discrete semiconductor noise diodes, as well as rectifying contacts of p-n junctions and metal-semiconductor junctions, under changing temperature conditions are investigated. Based on experimental studies of the electrophysical characteristics of noise diodes and modeling of a structure comprising a reverse-connected noise diode and a forward-connected compensating diode, a method for stabilizing the microplasma breakdown voltage of ND series noise diodes manufactured by Integral Holding, Republic of Belarus, is proposed. It is established that the dependence of the microplasma breakdown voltage for these noise diodes on temperature in the range of 24–125 °C is close to linear. This allows for temperature compensation of the breakdown voltage of a noise diode by connecting it in series with a forward-connected Schottky diode, a previously unused approach due to the narrow range of microplasma breakdown currents. It has been shown that the degree of thermal compensation, characterized by the magnitude of the slope of the linear approximation of the breakdown voltage dependence on temperature, depends on the electrophysical parameters of the noise generator diode and the compensating diode. Thermal compensation of the breakdown voltage using a discrete Schottky diode resulted in a 40% reduction in the noise cutoff frequency under normal climatic conditions. However, at a temperature of 125 °C, the cutoff frequency of the temperature-compensated noise diode more than doubles, reaching values characteristic of ND103L noise generator diodes. The research results suggest design and technological possibilities for expanding the operating temperature range of noise diodes in microplasma breakdown mode.

Keywords: noise generator diodes, temperature compensation, breakdown voltage, noise voltage spectral density, noise cutoff frequency, operating temperature range.