

47,5 В, формируемого анализатором при длительности импульса 50 мкс на нагрузке 0,5 Ом, ток через нагрузку составляет 93 А.

Анализатор используется для радиационных исследований силовых компонентов в ЦКП «Радиационный центр» при ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению».

Литература

1. Лисенков, Б. Н. Анализатор вольтамперных характеристик силовых полупроводниковых приборов / Б. Н. Лисенков, Н. В. Грицев, А. А. Бруек // Материалы 7-й международной научно-технической конференции «Приборостроение 2014», Минск, 2014 г. / БНТУ. – Мн.: БНТУ, 2014. – С. 90–92.

УДК 681.382

ШУМОВЫЕ ДИОДЫ С ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ

Латий О. О.¹, Буслюк В. В.², Дереченник С. С.², Емельянов В. А.³,
Кочергина О. В.⁴, Оджаев В. Б.⁵, Просолович В. С.⁵, Янковский Ю. Н.⁵, Черный В. В.⁶

¹ОАО «Цветотрон»

²УО «Брестский государственный технический университет»

Брест, Беларусь

³ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

⁴УО «Белорусская государственная академия связи»

⁵Белорусский государственный университет

⁶Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Аннотация. Исследованы электрофизические характеристики диодов-генераторов шума и проведено моделирование структуры, состоящей из диода-генератора шума, включенного в обратном направлении, и компенсирующего диода, включенного в прямом направлении. Установлено, что зависимость напряжения микроплазменного пробоя для данных шумовых диодов 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. 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.

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

NOISE DIODES WITH TEMPERATURE COMPENSATION OF ELECTRIC BREAKDOWN VOLTAGE

Latiy O. O.¹, Buslyuk V. V.², Derechennik S. S.², Yemelyanov V. A.³, Kochergina O. V.⁴,
Odzaev V. B.⁵, Prosolovich V. S.⁵, Yankovski Yu. N.⁵, Chornyi V. V.⁶

¹"Tsvetotron" Joint Stock Company

²Brest State Technical University

Brest, Belarus

³"INTEGRAL" Joint Stock Company

⁴Belarusian State Academy of Communications

⁵Belarusian State University

⁶Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. Electrophysical characteristics of noise generator diodes are investigated, and simulation of structure consisting of noise generator diode connected in reverse direction and compensating diode connected in forward direction is carried out. It was found that the dependence of the microplasma breakdown voltage for these noise diodes on the temperature in the range of 24–125 °C is close to linear. This allows temperature compensation of the breakdown voltage of the noise diode by connecting it in series with a directly connected Schottky diode. It is shown that the degree of thermal compensation, characterized by the value of the angular coefficient of linear approximation of the dependence of the breakdown voltage on temperature, depends on the electrophysical parameters of the noise diode-generator and the compensating diode.

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

Адрес для переписки: Просолович В. С., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: prosolovich@bsu.by

Введение. Шумовые диоды (ШД), использующие эффект лавинного пробоя, обладают возможностью создавать целенаправленно сгенерированный шум, который используется в аппаратно-программных системах защиты информации и метрологии [1]. Однако величина напряжения лавинного пробоя обратносмещенного p - n -перехода зависит температуры. Это приводит к значительному изменению величин постоянного напряжения пробоя, спектральной плотности напряжения шума (СПНШ), а также температурного коэффициента СПНШ. Вследствие этого ШД стабильно генерируют широкополосный шум с приемлемым коэффициентом корреляции лишь в узком диапазоне температур. Целью настоящей работы явилось проектирование термостабилизирующего устройства для ШД, работающего в широком диапазоне температур.

Методы исследования. Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) шумовых диодов с целью установления влияния термокомпенсирующего диода на электрофизические параметры приборов проводились на измерителе параметров интервале температур 24–125°C. Моделирование структуры, включающей диод-генератор шума, включенный в обратном направлении, и компенсирующий диод, включенный в прямом направлении, проводилось в *COMSOL Multiphysics*. Исследовались диоды генераторы шума марок *ND102L*, *ND103L* и *ND104L*. В качестве компенсирующих диодов были выбраны выпрямительные диоды Шоттки 1N60 и 1N5819.

Экспериментальные результаты. ШД проектируются таким образом, чтобы использовать преимущественно ударную ионизацию носителей заряда и лавинный пробой p - n -перехода на начальном участке пробоя вольт-амперной характеристики (ВАХ). Измерение ВАХ при обратном включении диодов показало, 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 [2]. Таким образом, ШД имеют положительный температурный коэффициент напряжения пробоя (ТКН). Для обеспечения термостабильности обратной ветви ВАХ диода может быть последовательное соединение обратно-смещенного p - n -перехода с положительной величиной температурного коэффициента напряжения и прямо смещенного p - n -перехода с отрицательной величиной ТКН. Моделирование такой структуры показало, что наиболее перспективным является применение в качестве термокомпенсирующего элемента выпрямляющего контакта металл-полупроводник (диода Шоттки), имеющего отрицательный ТКН, включенного в прямом направлении. В качестве компенсирующих диодов были выбраны выпрямительные диоды Шоттки 1N60 и 1N5819, различающиеся рабочим током и временем

обратного восстановления (для 1N60 – $1 \cdot 10^{-9}$ с). В таблице приведены измеренные средние значения шумовых параметров диодов – генераторов шума *ND103L*, а также средние значения этих же шумовых параметров с включенными дополнительно последовательно компенсирующими диодами Шоттки 1N60 и 1N5819. Видно, что исследуемые шумовые параметры во всех случаях имеют зависимость от температуры близкую к линейной. Степень температурной компенсации может быть оценена по угловым коэффициентам усредненных прямых зависимости напряжения пробоя от температуры.

Таблица 1 – Средние значения шумовых параметров диодов в зависимости от температуры

Шумовые параметры	Типы ШД	Температура, °C		
		24	70	125
$U_{эфф}$, мВ	<i>ND103L</i>	115,30	85,76	49,94
	<i>ND103L</i> + <i>1N5819</i>	98,88	72,20	49,94
	<i>ND103L</i> + <i>1N60</i>	98,6	70,00	36,42
СПНШ, мкВ/(Гц) ^{1/2}	<i>ND103L</i>	62,21	40,00	18,42
	<i>ND103L</i> + <i>1N5819</i>	57,33	34,36	15,42
	<i>ND103L</i> + <i>1N60</i>	59,32	34,53	14,28
$F_{гр}$, МГц	<i>ND103L</i>	5,62	5,15	8,32
	<i>ND103L</i> + <i>1N5819</i>	4,50	6,06	9,90
	<i>ND103L</i> + <i>1N60</i>	3,38	5,16	8,12
$U_{пр}$, В	<i>ND103L</i>	8,80	9,12	9,26
	<i>ND103L</i> + <i>1N5819</i>	8,94	9,06	9,30
	<i>ND103L</i> + <i>1N60</i>	9,11	9,26	9,39

Чем ближе модульное значение углового коэффициента $|k|$ в уравнении $y = kx + b$ (уравнение аппроксимированной прямой) к нулю, тем меньше зависимость шумового параметра от температуры. Было установлено, что 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. Следует отметить, что степень температурной компенсации больше у пары *ND103L*+*1N60*. Это обусловлено меньшим падением прямого напряжения для *1N60* при рабочем токе ШД и большей по сравнению с *1N5819* зависимостью прямой ветви ВАХ ДШ *1N60* от температуры. Очевидно, что величина степени термокомпенсации определяется электрофизическими параметрами компенсирующего диода.

Работа выполнена в рамках задания 3.11.3 ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», подпрограмма «Микро- и нанoeлектроника».

Литература

1. Винокуров, С. А. Генераторы шума (обзор) / С. А. Винокуров, В. Н. Кочемасов, А. Р. Сафин // Изв.

вузов России. Радиоэлектроника. – 2023. – Т. 26, № 4. – С. 6–32.

2. Грехов, И. В. Лавинный пробой р-п-перехода в полупроводниках / И. В. Грехов, Ю. Н. Сережкин. – Л.: Энергия. Ленингр. отделение, 1980. – 152 с.

УДК 621.822.7:621.7.083

ПЛАНЕТАРНАЯ ДОВОДКА ШАРИКОВ ИЗ КАМНЕСАМОЦВЕТНОГО СЫРЬЯ

Луговой В. П., Попов Р. А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Рассматривается модернизированное устройство доводки шариков, совершающих планетарное движение, что позволяет ускорить процесс их обработки.

Ключевые слова: устройство, доводка, шарик, камнесамоцветы.

PLANETARY FINISHING OF BALLS FROM GEMSTONE RAW MATERIALS

Lugovoi V. P., Popov R. A.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. A modernized device for finishing balls performing planetary motion is being considered, which allows for speeding up the process of their processing.

Keywords: device, finishing, balls, gemstones.

*Адрес для переписки: Луговой В. П., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: lugovoi@bntu.by*

В современных условиях шарик из неметаллов являются часто используемыми элементами украшений. Спрос на них неуклонно растет в различных отраслях, включая ювелирную. Такие шарик могут быть изготовлены из различных камнесамоцветных материалов, керамики, ситаллов, поли- и монокристаллических структур [1]. Зачастую они отличаются хрупкостью, что ограничивает применение многих известных способов для обработки твердых материалов. Сложность доводки шариков заключается в обеспечении их трехосного вращения с целью повышения равномерности шлифования по всему поверхности в абразивной среде и в результате – повышения точности формы и размеров.

Существует множество способов доводки шариков из металлов, большая часть из которых имитирует работу упорного подшипника, один из инструментов в котором имеет U-образную или V-образную канавку. Недостаток таких устройств заключается в том, что шарик получают в процессе обкатки преимущественно одно- или двусное вращение [2], поэтому они не всегда применимы для обработки неметаллических шариков.

Широко используемым способом шлифования шариков из хрупких материалов, нашедшим применение в оптическом производстве, является способ, обеспечивающий планетарное движение заготовки между двумя дисками [3]. Данный способ дает необходимую точность обработки, однако не обладает высокой производительностью шлифования. Подобные схемы обработки предложены в устройствах, приведенных в [4–6].

Сложное движение шариков по замкнутой кривой второго порядка достигается в способе обработки шариков [7], в котором либо изменяется траектория движения инструмента-планшайбы, ей придается движение по эллиптической или любой

другой замкнутой кривой, либо изменяется скорость ее вращения. К недостаткам такого способа следует отнести усложненность привода планетарного движения планшайбы.

В статье [8] предложен метод обработки шариков в устройстве, которое позволяет изменить скорость и направление вращения шариков вокруг своих осей без дополнительных источников движения. Однако дополнительное движение шариков достигается при кратковременном изменении угловой скорости диска.

В настоящей работе предлагается модернизировать данное устройство для планетарной обработки шариков (рисунок 1, а), которое достигается путем применения дополнительной направляющей движения диска. Это позволяет достигнуть равномерного съема материала заготовки.

Устройство состоит из привода с кривошипом, стола с оснасткой, совершающего планетарное движение, и диска с коническими отверстиями, который служит инструментом.

Шарик 1 находится между диском с коническими отверстиями 2, и столом 4. Стол 4 совершает планетарное движение, передаваемое ему кривошипом 8. Верхний диск 2 получает периодическое движение, возникающее при касании его боковой поверхности с губчатой резиной полукруглой направляющей 6. Для увеличения трения стол 4 покрыт листовой резиной 3. Таким образом осуществляется совместное движение стола 4 (с угловой скоростью ω) и (циклическим дополнительным движением $S_{\text{доп}}$) диска 2. Для увеличения трения шарика 1 на палец 5 воздействует нагрузка Р. Нагрузка так же способствует интенсивности съема материала заготовки. Траектория движения шарика при этом способе обработки имеет вид сложной циклоиды