



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-6-32-41>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.2:53.096

СТАБИЛИЗАЦИЯ ШУМОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ОТЖИГЕ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТРУКТУР ДИОДОВ – ГЕНЕРАТОРОВ ШУМА

В.В. БУСЛЮК¹, В.А. ЕМЕЛЬЯНОВ², В.В. БАРАНОВ³, С.С. ДЕРЕЧЕННИК¹,
В.С. ПРОСОЛОВИЧ⁴

¹Брестский государственный технический университет (г. Брест, Республика Беларусь)

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь)

³Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

⁴Белорусский государственный университет (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 15 апреля 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Стабилизация остаточных точечных дефектов на финишных этапах изготовления шумовых диодов может быть обеспечена подбором соответствующих режимов отжига и среды его проведения. Предложен метод и технология снижения концентрации точечных дефектов в структуре *p-n*-перехода с учетом содержания в структурах примесей вторичных металлов, кислорода и азота. Установлено, что отжиг готовых структур и диодов генераторов шума в среде азота при температурах 450...600 °С в течение (80 ± 3) мин приводит к повышению спектральной плотности шума и значительному (почти двукратному) снижению ее неравномерности. Важнейшим результатом этого отжига является снижение разброса средних значений исследуемых параметров шума: по эффективному напряжению шума – на 61,2 %; по спектральной плотности – на 34,2 %; по граничной частоте сигнала – на 34,9 %; по нелинейности спектральной плотности – на 25,9 %. Это позволяет улучшить качество случайных числовых последовательностей в программно-аппаратных комплексах защиты информации.

Ключевые слова: технология диодов – генераторов шума, отжиг, твердотельная структура, примеси, дислокации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Буслюк В.В., Емельянов В.А., Баранов В.В., Дереченник С.С., Просолович В.С. Стабилизация шумовых параметров при отжиге высоколегированных структур диодов – генераторов шума. Доклады БГУИР. 2021; 19(6): 32-41.

STABILIZATION OF NOISE PARAMETERS DURING ANNEALING OF HIGHLY ALLOYED STRUCTURES OF NOISE DIODES

VIKTAR V. BUSLIUK¹, VICTOR A. EMELYANOV², VALENTIN V. BARANOV³,
STANISLAV S. DERECHENNIK¹, ULADISLAU S. PRASALOVICH⁴

¹*Brest State Technical University (Brest, Republic of Belarus)*

²*“INTEGRAL” Joint Stock Company (Minsk, Republic of Belarus)*

³*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

⁴*Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 15 April 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Stabilization of residual point defects at the finishing stages of noise diodes can be ensured by the selection of appropriate ignition modes and the environment of its conduct. The method and technology of reducing the concentration of point defects in the structure of *p-n*-transition, taking into account the content of impurities of secondary metals, oxygen and nitrogen is proposed. It has been established that the burning of ready-made structures and diodes of noise generators in nitrogen environments at temperatures of 450...600 °C for (80 ± 3) min leads to an increase in spectral noise density and a significant (twice) reduction of its unevenness. The most important result of this burn is a reduction in the spread of the average values of the noise parameters studied: by 61.2 % in effective noise voltage; spectral density by 34.2 %; at the boundary frequency of the signal by 34.9 %; in non-linear density by 25.9 %. This improves the quality of random numerical sequences in information protection software systems.

Keywords: technology of noise diodes, annealing, solid-state structure, impurities, dislocation.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Busliuk V.V., Emelyanov V.A., Baranov V.V., Derechennik S.S., Prasalovich U.S. Stabilization of noise parameters during annealing of highly alloyed structures of noise diodes. *Doklady BGUIR*. 2021; 19(6): 32-41.

Введение

Решение задачи создания криптографически случайных числовых последовательностей в аппаратно-программных комплексах защиты информации требует стабильного шума в широком диапазоне частот с заданными спектральными характеристиками. В качестве источников шума используются полупроводниковые диоды (диоды – генераторы шума, лавинно-пролетные диоды, стабилитроны). Для диодов – генераторов шума (ДГШ) критическими параметрами являются: спектральная плотность шума, ее нелинейность, граничная частота, а также средние значения эффективного напряжения шума. В связи с действием различных внешних факторов, особенно при эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры в «жестких» условиях, требуется особая стабильность электрофизических параметров и гарантированная надежность изделий.

Причинами шума ДГШ являются микроплазменные образования в области пространственного заряда (ОПЗ) диодов, зависящие от неоднородностей структуры, дефектов, а также характера переноса тока в малых по площади (как правило, не более 500 мкм²) ОПЗ. Для стабилизации шума ранее проведены исследования и экспериментально установлено, что преимущественными дефектами структуры ДГШ являются неоднородности легирования и примесные вторичные атомы меди и железа [1], дислоцированные, вероятно, в междоузлиях кристаллов кремния, а также входящие в состав преципитатов и комплексов на их основе. Динамика их образования специфична для конкретной конструкции и технологии изготовления шумовых диодов.

Одним из способов геттерирования дефектов в структуре является термообработка [2]. С учетом значительного содержания кислорода в высоколегированных структурах ДГШ

стабилизация остаточных неравновесных собственных точечных дефектов (СТД) на финишных этапах изготовления может быть обеспечена подбором соответствующих режимов отжига и среды его проведения. Формирующиеся при термообработках неравновесные СТД существенно влияют на образование электрически активных центров, ответственных за процессы ударной ионизации и генерации-рекомбинации носителей зарядов в структурах с глубокими *p-n*-переходами¹. На рис. 1 приведен график зависимости концентрации кислородосодержащих термодоноров от температуры отжига, которая имеет выраженную область максимума в диапазоне температур 450...600 °С.

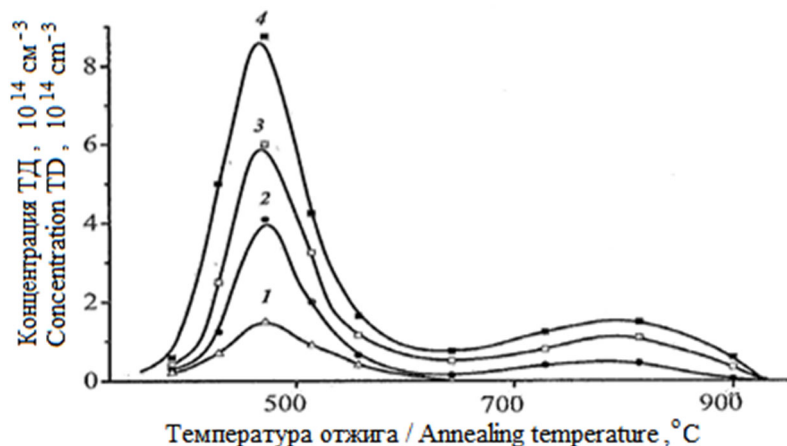


Рис. 1. Температурная зависимость концентрации термодоноров за 1 ч отжига при исходной концентрации кислорода (см^{-3}): 1 – $2 \cdot 10^{18}$; 2 – $1,85 \cdot 10^{18}$; 3 – $1,6 \cdot 10^{18}$; 4 – $1,2 \cdot 10^{18}$ [3]

Fig.1. Temperature dependence of the concentration of thermal donors for 1 hour of annealing at the initial oxygen concentration (см^{-3}) of: 1 – $2 \cdot 10^{18}$; 2 – $1,85 \cdot 10^{18}$; 3 – $1,6 \cdot 10^{18}$; 4 – $1,2 \cdot 10^{18}$ [3]

Известно, что при отжиге структур при таких температурах в течение 1 ч наблюдается рост концентрации термодоноров, что приводит к образованию устойчивых зародышей кислородосодержащих преципитатов. При таком отжиге структур растет и концентрация межузельных атомов кремния с неопределенным положением в кристаллической решетке. Причиной такого явления могут быть значительные искажения решетки и, как следствие, формирование упругих напряжений на границе кремния с кислородными преципитатами вследствие практически двукратной разницы в размерах молекулы SiO_2 и атома Si [3, 4]. Межузельные атомы Si потенциально способны взаимодействовать с кислородом и азотом, образуя преципитаты и устойчивые комплексы. Наличие упругих напряжений способствует формированию преципитатов и комплексов вторичных примесных атомов и СТД, которые локализуются вблизи дислокаций и остаются затем стабильными в диапазоне сравнительно невысоких (до +70 °С) температур эксплуатации ДГШ.

Методика исследования влияния отжига на параметры диодов – генераторов шума

В работе исследованы электрофизические параметры кремниевых диодов – генераторов шума ND103, изготовленных по диффузионной технологии на основе подложек монокристаллического кремния марки КДБ 0,03 (111) 40-460. Глубина *p-n*-перехода, сформированного диффузией фосфора, составляла ~6 мкм. Содержание технологической примеси кислорода в монокристаллическом кремнии составляло $1,1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Отжиг структур производился в печи PP 40/85 фирмы Sokol-Therm Deutschland GmbH в среде азота. Отжигу в идентичных режимах подвергались как кристаллы шумовых диодов в отдельности, так и, собственно, ДГШ с такими кристаллами, герметизируемые в металлостеклянных корпусах (отжиг, совмещенный с герметизацией).

¹Соболев Н.А. *Физические основы инженерии дефектов в технологии кремниевых силовых высоковольтных и светоизлучающих структур: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.10.* Санкт-Петербург: Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН; 2009: С. 85.

Время отжига подбиралось из условия минимального (33–35 мин) и максимально допустимого (установлено в ходе исследований) для герметизации металлостеклянного корпуса полупроводниковых приборов для поверхностного монтажа КД-34 (minimelf). При этом использовался стекло-капилляр JD38 фирмы CIT-Ireland Ltd. Оптимизация режимов отжига производилась по критерию максимального выхода годных ДГШ. Отжиг в диапазоне температур 450...600 °С производился в течение 40...80 мин (девять режимов, с увеличением времени герметизации для каждого на 5 мин и снижением температуры выдержки до 598 °С). Наилучшие результаты были достигнуты при длительности процесса отжига, совмещенного с герметизацией, составляющей 80 мин (допустимое отклонение ± 3 мин). Температурный профиль совмещенного с герметизацией отжига представлен на рис. 2.

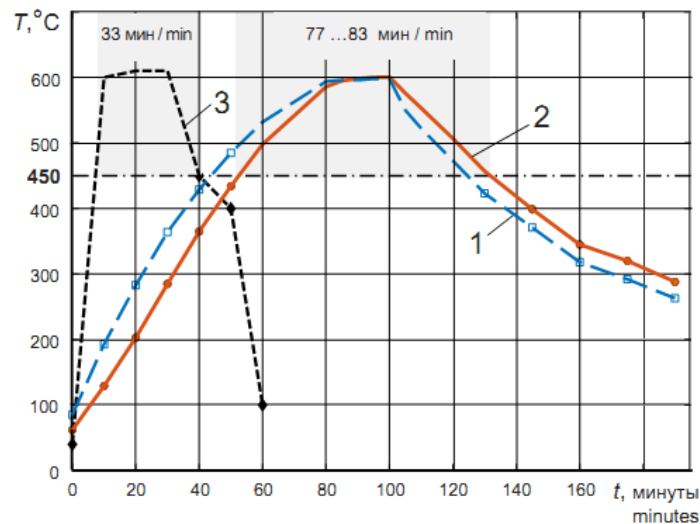


Рис. 2. Температурный профиль отжига, совмещенного с герметизацией: 1 – температура, задаваемая системой управления печи; 2 – фактическая температура в cassette герметизации-отжига; 3 – стандартный температурный профиль герметизации диодов в печи «Алунд» (для сравнения)

Fig. 2. Temperature profile of annealing combined with sealing: 1 – temperature set by the furnace control system; 2 – actual temperature in the sealing-annealing cassette; 3 – standard temperature profile of diodes sealing in the “Alund” furnace (for comparison)

Измерялись следующие электрические параметры шумового сигнала кристаллов и диодов: спектральная плотность напряжения шума (S_u) и ее нелинейность (δS_u), граничная частота сигнала ($f_{гп}$), эффективное напряжение шума ($U_{эф}$). Измерения проводились на автоматизированном комплексе измерения электрических параметров шумовых диодов АКИД (ЭКОН.441111.001, ОАО «Планар», Республика Беларусь) по встроенному алгоритму обработки 400 текущих отсчетов напряжения шумового сигнала, полученных с частотой дискретизации 50 МГц. Объем выборок для измерений кристаллов до отжига и после отжига – по 15 штук, после отжига, совмещенного с герметизацией – по 45 штук.

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведены значения электрических параметров кристаллов шумовых диодов ND103 до и после отжига, в табл. 2 – значения характеристик кристаллов шумовых диодов ND103 до отжига и ДГШ ND103L после отжига, совмещенного с герметизацией.

Как сами анализируемые параметры, так и их изменения в процессе отжига, носят случайный характер. Анализ средних значений параметров показывает, что отжиг практически одинаково влияет как на кристаллы, отжигаемые отдельно, так и на кристаллы в составе герметизируемого диода. Так, например, и для кристаллов, и для ДГШ спектральная плотность напряжения возрастает в 1,10 / 1,09 раза, ее нелинейность снижается в 1,74 / 1,75 раза, эффективное напряжение шума – в 1,05 / 1,0 раза, граничная частота – в 1,54 / 1,56 раза. Поэтому в дальнейшем статистический анализ с целью определения числовых характеристик измеренных случайных параметров осуществлялся только применительно к ДГШ как конечному изделию.

В табл. 3 представлены следующие числовые характеристики выборок измерений по каждому анализируемому случайному параметру: минимальное и максимальное значения, размах выборки, среднее, среднеквадратическое отклонение (СКО), медианное значение (медиана) выборки.

Таблица 1. Электрические параметры кристаллов ДГШ ND103 до и после отжига
Table 1. Electrical parameters of ND103 noise diode crystals before and after annealing

Номер кристалла Crystal number	Наименование и обозначение параметра Parameter name and notation							
	Спектральная плотность напряжения шума Noise voltage spectral density		Нелинейность спектральной плотности Spectral density nonlinearity		Граничная частота шумового сигнала Noise signal cutoff frequency		Эффективное напряжение шума Effective noise voltage	
	$S_u, \text{мкВ/Гц}^{1/2}$ ($\mu\text{V/Hz}^{1/2}$)		$\delta S_u, \text{дБ (dB)}$		$f_{гр}, \text{МГц (MHz)}$		$U_{эф}, \text{мВ (mV)}$	
	до отжига before annealing	после отжига after annealing	до отжига before annealing	после отжига after annealing	до отжига before annealing	после отжига after annealing	до отжига before annealing	после отжига after annealing
1	58	58	1,64	1,06	3,76	2,49	144	126
2	48	53	1,93	0,90	4,20	2,93	128	122
3	60	68	1,60	1,09	3,47	2,01	145	140
4	49	55	1,93	1,10	4,05	2,59	132	125
5	58	58	1,47	0,83	3,71	2,39	144	126
6	70	77	1,76	0,80	3,12	1,95	164	147
7	55	64	1,73	0,88	3,71	2,05	137	132
8	34	–	1,56	–	5,03	–	101	–
9	48	52	1,61	0,78	4,20	3,03	127	122
10	61	62	1,68	0,94	3,51	2,44	152	133
11	58	59	1,53	0,92	3,56	2,59	143	132
12	52	59	1,89	0,89	4,00	2,73	136	132
13	52	57	1,70	0,90	3,96	2,69	133	129
14	57	60	1,50	1,19	3,61	2,59	143	132
15	61	63	1,65	1,21	3,61	2,34	149	138
Среднее Mean	54,7	60,4	1,679	0,964	3,833	2,487	138,5	131,1

Примечание. Кристалл № 8 после отжига был утерян.

Таблица 2. Электрические параметры кристаллов ДГШ ND103 до отжига, а также ДГШ ND103 после отжига, совмещенного с герметизацией

Table 2. Electrical parameters of ND103 noise diode crystals before and after annealing

Номер кристалла Crystal number	Наименование и обозначение параметра Parameter name and notation							
	Спектральная плотность напряжения шума Noise voltage spectral density		Нелинейность спектральной плотности Spectral density nonlinearity		Граничная частота шумового сигнала Noise signal cutoff frequency		Эффективное напряжение шума Effective noise voltage	
	$S_u, \text{мкВ/Гц}^{1/2}$ ($\mu\text{V/Hz}^{1/2}$)		$\delta S_u, \text{дБ (dB)}$		$f_{гр}, \text{МГц (MHz)}$		$U_{эф}, \text{мВ (mV)}$	
	до отжига before annealing	после отжига after annealing	до отжига before annealing	после отжига after annealing	до отжига before annealing	после отжига after annealing	до отжига before annealing	после отжига after annealing
1	54	55	1,87	1,10	3,81	2,64	138	125
2	60	67	1,63	0,94	3,61	2,44	148	142
3	54	57	1,83	0,82	3,91	2,49	138	124
4	52	64	1,58	1,15	3,76	2,39	134	138
5	53	68	1,61	1,00	3,86	2,34	135	148
6	54	64	1,79	0,85	3,76	2,15	138	130
7	72	68	1,37	0,96	3,08	2,20	164	139
8	58	68	1,72	0,92	3,61	2,29	145	139

Окончание таблицы 2
End of Table 2

9	71	68	1,76	1,06	3,22	1,76	168	133
10	49	55	1,60	0,87	4,00	2,72	126	123
11	62	59	1,79	0,95	3,42	2,05	149	123
12	54	64	1,79	0,88	3,91	2,54	141	139
13	55	66	1,72	0,99	3,86	2,20	140	140
14	53	66	1,95	0,96	3,81	2,34	137	142
15	63	57	1,51	1,14	3,32	2,73	150	125
Среднее Mean	57,6	63,1	1,701	0,973	3,663	2,352	143,4	134

Таблица 3. Значения числовых характеристик случайных параметров кристаллов до отжига и диодов – генераторов шума ND103 после отжига

Table 3. Values of the numerical characteristics of the random parameters of crystals before annealing and noise diodes ND103 after annealing

Режим измерений Measurement mode	Наименование и обозначение числовых характеристик для выборок измерений случайных параметров Name and notation of numerical characteristic for samples of measurements of random values						Существенные изменения характеристик Significant changes of characteristics
	минимум minimum (min)	максимум maximum (max)	размах range (R)	среднее mean (m)	СКО standard deviation (σ)	медиана median (Me)	
Для выборки измерений спектральной плотности напряжения шума S_u , мкВ/Гц ^{1/2} ($\mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$) For the sample of measurements of the voltage noise spectral density							
До отжига (кристаллы) Before annealing (crystals)	34	72	38	56,6	7,26	55	рост: increase: m_{Su} : 9,9 %; падение: decrease: σ_{Su} : 34 %, R_{Su} : 34,2 %
После отжига (ДГШ) After annealing (noise diodes)	52	77	25	62,2	5,52	64	
Для выборки измерений нелинейности спектральной плотности напряжения шума δS_u , дБ For the sample of measurements of the spectral density nonlinearity of the noise voltage δS_u , dB							
До отжига (кристаллы) Before annealing (crystals)	1,37	1,95	0,58	1,70	0,147	1,72	падение: decrease: m_{Su} : 42,9 %, σ_{Su} : 23 %, R_{Su} : 25,9 %
После отжига (ДГШ) After annealing (noise diodes)	0,78	1,21	0,43	0,97	0,113	0,96	
Для выборки измерений граничной частоты шумового сигнала $f_{гр}$, МГц (MHz) For the sample of measurements of the noise signal cutoff frequency							
До отжига (кристаллы) Before annealing (crystals)	3,08	5,03	1,95	3,72	0,345	3,76	падение: decrease: m_{Su} : 35,5 %, σ_{Su} : 17,8 %, R_{Su} : 34,9 %
После отжига (ДГШ) After annealing (noise diodes)	1,76	3,03	1,27	2,40	0,283	2,39	
Для выборки измерений эффективного напряжения шума $U_{эф}$, мВ (mV) For the sample of measurements of the effective noise voltage							
До отжига (кристаллы) Before annealing (crystals)	101	168	67	141,8	12,18	140,0	падение: decrease: m_{Su} : 6,1 %, σ_{Su} : 35,3 %, R_{Su} : 61,2 %
После отжига (ДГШ) After annealing (noise diodes)	122	148	26	133,1	7,88	132,5	

Исследование средних значений, среднеквадратических отклонений и медиан (табл. 4) показывает, что отжиг при температуре 450...600 °С приводит к изменению значений числовых характеристик, однако они не выходят за границы диапазона «трех сигм» ($\pm 3\sigma_x$) по каждому из них, что говорит о стабильности предложенного техпроцесса.

Таблица 4. Определение диапазона «трех сигм» для электрических параметров ДГШ ND 103L после отжига
Table 4. Determination of the three-sigma rule range for electrical parameters of ND 103L noise diodes after annealing

Наименование и обозначение параметра Parameter name and notation	Значения числовых характеристик Values of the numerical characteristics			
	среднее mean (m)	Утроенное СКО triple standard deviation (3σ)	нижняя граница диапазона lower range limit ($m-3\sigma$)	верхняя граница диапазона upper range limit ($m+3\sigma$)
Спектральная плотность напряжения шума Noise voltage spectral density S_u , мкВ/Гц ^{1/2} ($\mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$)	62,20	16,57	45,63	78,77
Нелинейность спектральной плотности Spectral density nonlinearity δS_u , дБ (dB)	0,97	0,34	0,63	1,31
Граничная частота шумового сигнала Noise signal cutoff frequency $f_{гр}$, МГц (MHz)	2,40	0,85	1,55	3,25
Эффективное напряжение шума Effective noise voltage $U_{эф}$, мВ (mV)	133,09	23,63	109,46	156,72

В результате отжига при температуре 450... 600 °С в течение (80 ± 3) мин, в соответствии с приведенным графиком, произошло ожидаемое изменение средних значений исследуемых параметров: граничной частоты сигнала (снижение на 35,5 %), эффективного напряжения шума (снижение на 6,1 %), спектральной плотности шумового сигнала в среднечастотной области (увеличение до 9,9 %) при почти двукратном снижении ее неравномерности (снижение на 42,9 %). При 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 %.

Наиболее существенным результатом отжига явилось значительное снижение нелинейности спектральной плотности шума. На рис. 3 представлены гистограммы распределения нелинейности спектральной плотности шумового сигнала до отжига (белые прямоугольные столбцы справа) и после отжига ДГШ (цилиндрические столбцы слева), которые отображают полученный результат, а также допустимое значение по технологическим нормам (заштрихованная полоса на уровне 2,0 дБ). Это свидетельствует о повышении стабильности как самих параметров, так и предложенного техпроцесса в целом. Результирующие параметры ДГШ не выходят за пределы диапазонов, установленных техническими условиями и лучше параметров западных аналогов. Анализ полученных данных позволил сделать вывод о положительном влиянии предложенного режима отжига на параметры ДГШ.

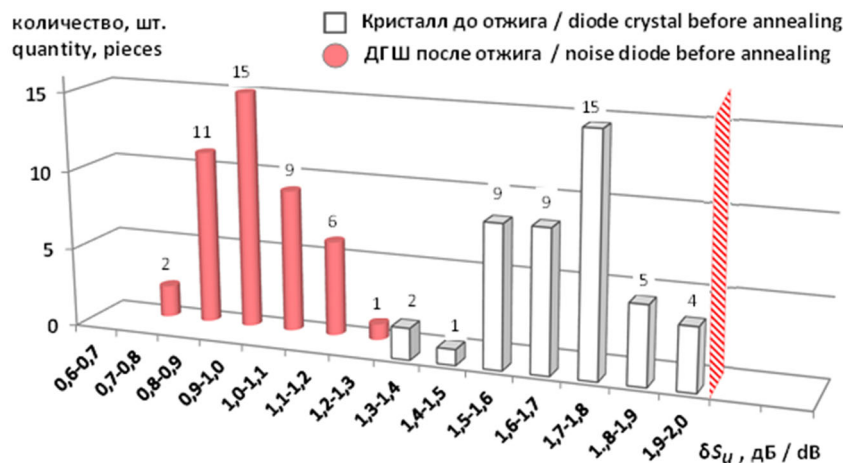


Рис. 3. Гистограммы распределения нелинейности спектральной плотности шумового сигнала до отжига кристаллов и после отжига ДГШ (заштрихованная полоса на уровне 2,0 дБ – предельно допустимое значение по технологическим нормам)

Fig. 3. Histograms of the distribution of the nonlinearity of the spectral density of the noise signal before annealing of crystals and after annealing of noise diodes (stripped shape at 2.0 dB shows the maximum allowed value according to the technology-specific rules)

Положительные изменения электрофизических параметров ДГШ, очевидно, обусловлены стабилизацией дефектно-примесного ансамбля структур при термообработке в азотсодержащей атмосфере в температурном интервале 450...600 °С. Как сказано выше, в кремнии, содержащем технологическую примесь кислорода высокой концентрации, в данной температурной области происходит формирование термодоноров, являющихся зародышами кислородсодержащих преципитатов. Данные преципитаты являются эффективными геттерами технологических примесей [5]. Такие примеси вводятся в материал при высокотемпературных технологических процессах формирования полупроводниковых приборов (например, диффузия) и являются одним из компонентов, обуславливающих лавинный пробой *p-n*-переходов. Конденсация на зародышах кислородных преципитатов (вследствие наличия вокруг преципитатов полей упругих напряжений) технологических примесей приводит к стабилизации дефектно-примесного ансамбля. Кроме того, нельзя исключать влияния азотсодержащей атмосферы на процессы дефектно-примесного взаимодействия при отжиге кристаллов. Так, в [6] установлено: при температурах термообработки 430...480 °С атомы азота активно взаимодействуют с вакансиями, что приводит к увеличению концентрации неравновесных собственных междоузельных атомов, являющихся одним из составных элементов зародышей кислородных преципитатов. Не следует также исключать вероятность того, что отжиг в азотсодержащей атмосфере приводит к азотированию пассивирующего оксида. В результате происходит насыщение оборванных связей на границе Si-SiO₂ [7], что в конечном итоге обуславливает уменьшение поверхностных токов утечки и стабилизацию электрофизических параметров ДГШ.

Исследования аппаратных средств генерации аналоговых и импульсных (цифровых) шумовых сигналов, построенных на основе шумовых диодов ND103 и их аналогов, показали, что достижение приемлемых вероятностных характеристик сигналов непосредственно связано с техническими параметрами диода [8]. В частности, увеличение нелинейности спектральной плотности напряжения шума приводит к ухудшению статистических характеристик потока двоичных данных [9]. С другой стороны, контроль статистических характеристик сигнала может быть использован для оперативной оценки качества шумового диода как источника физического шума [10].

Выводы

Таким образом, отжиг сильнолегированных структур в течение (80 ± 3) мин при температуре 450...600 °С на финишной стадии технологического процесса в присутствии быстродиффундирующих примесей, азота и кислорода приводит к стабилизации неравновесных собственных точечных дефектов и, как следствие, к улучшению электрофизических параметров ДГШ. В результате такой обработки снижается разброс средних значений основных контролируемых параметров ДГШ, а также повышается спектральная плотность шума и значительно (почти вдвое) снижается ее неравномерность. Улучшение качества ДГШ как источника физического шума позволяет обеспечить повышение равномерности распределения чисел при генерации криптографически случайных числовых последовательностей.

Список литературы

1. Буслюк В.В., Оджаев В.Б., Панфиленко А.К., Петлицкий А.Н., Просолович В.С., Филипеня В.А., Янковский Ю.Н. Электрофизические параметры диодов генераторов широкополосного шума. *Микроэлектроника*. 2020;49(4):314-320.
2. Лабунов В.А. Баранов И.Л., Бондаренко В.П., Дорофеев А.М. Современные методы геттерирования в технологии полупроводниковой электроники. *Зарубежная электронная техника*. 1983;11(270):3-66.
3. Вабищевич Н.В., Бринкевич Д.И., Просолович В.С. Кислородные преципитаты и формирование термодоноров в кремнии. *Физика и техника полупроводников*. 1998;32(6):712-713.
4. Просолович В.С., Янковский Ю.Н. *Дефектно-примесное взаимодействие в полупроводниках*. Минск: БГУ; 2009.
5. Vasil'ev Yu.B., Verezub N.A., Mezennyi M.V., Prosolovich V.S., Prostomolotov A.I., Reznik V.Ya. Features of defect formation under the thermal treatment of dislocation-free single-crystals large-diameter

- silicon wafers with the specified distribution of oxygen-containing gettering centers in the bulk. *Russian microelectronics*. 2013;42(8):467-476.
6. Челядинский А.Р., Явид В.Ю., Венгерэк П. Накопление радиационных дефектов в кремнии при имплантации ионов азота. 5-я международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом». Минск; 2003: 206-208.
 7. Красников Г.Я. *Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП транзисторов*. Москва: Техносфера; 2011.
 8. Разумейчик В.С., Буслюк В.В., Дереченник С.С., Поляков В.И., Лапич С.В. Оценка вероятностных характеристик случайных сигналов микроэлектронного шумового модуля. *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2014;5(89):41-45.
 9. Пикуза М.О., Михневич С.Ю. Тестирование аппаратного генератора случайных чисел при помощи набора статистических тестов NIST. *Доклады БГУИР*. 2021;19(4):37-42.
 10. Железняк В.К., Раханов К.Я., Рябенко Д.С., Буслюк В.В., Ворончук С.И., Лешкевич И.В., Дереченник С.С. Концепция оценки для оперативного контроля источников шумового сигнала. *XVI научно-практическая конференция «Комплексная защита информации»*. Минск; 2011: 273-276.

References

1. Buslyuk V.V., Odzhayev V.B., Panfilenko A.K., Petlitsky A.N., Prosolovich V.S., Filipyena V.A., Yankovsky Yu. N. [Physical Parameters of the Broadband Noise-Generator Diodes]. *Russian Microelectronics*. 2020;49(4):295-301.
2. Labunov V.A., Baranov I.L., Bondarenko V.P., Dorofeev A.M. [Modern gettering methods in semiconductor electronics technology]. *Zarubezhnaya elektronnaya tekhnika = Zarubezhnaya elektronnaya tekhnika*. 1983;11:3-66. (In Russ.)
3. Vabishchevich N.V., Brinkevich D.I., Prosolovich V.S. [Oxygen precipitates and the formation of thermal donors in silicon]. *Semiconductors*. 1998;32:640-641.
4. Prosolovich V.S., Yankovsky Yu.N. [*Defect-doping interaction in semiconductors: a course of lectures*]. Minsk: BGU; 2009. (In Russ.)
5. Vasil'ev Yu.B., Verezub N.A., Mezennyi M.V., Prosolovich V.S., Prostomolotov A.I., Reznik V.Ya. Features of defect formation under the thermal treatment of dislocation-free single-crystals large-diameter silicon wafers with the specified distribution of oxygen-containing gettering centers in the bulk. *Russian microelectronics*. 2013; 42(8):467-476.
6. Chelyadinsky A.R., Yavid V.Yu., Vengerek P. [Accumulation of radiation defects in silicon upon implantation of nitrogen ions]. *Pyataya Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya «Vzaimodeystviye izlucheniya s tverдыm telom» = 5th International Scientific Conference "Interaction of radiations with a solid"*. Minsk; 2003: 206-208. (In Russ.)
7. Krasnikov G.Ya. [*Design and technological features of submicron MOS transistors*]. Moscow: Tekhnosfera; 2011. (In Russ.)
8. Razumeichik V.S., Busliuk V.V., Derechennik S.S., Polyakov V.I., Lapich S.V. [Estimation of the probabilistic characteristics of random signals of a microelectronic noise module]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = VESTNIK Brest State Technical University*. 2014;6(5):41-45. (In Russ.)
9. Pikuza M.O., Mikhnevich S.Yu. [Testing a hardware random number generator using NIST statistical test suite]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2021;19(4):37-42. (In Russ.)
10. Zheleznyak V.K., Rakhanov K.Ya., Ryabenko D.S., Busliuk V.V., Voronchuk S.I., Leshkevich I.V., Derechennik S.S. [Assessment concept for operational control of noise signal sources]. *XVI nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Kompleksnaya zashchita informatsii" = XVI Scientific and Practical Conference "Comprehensive Information Security"*. Minsk; 2011: 273-276. (In Russ.)

Вклад авторов

Буслюк В.В. разработал методику, провел исследование влияния отжига на параметры шумовых диодов, выполнил обработку и анализ результатов.

Емельянов В.А. выполнил постановку задачи исследований, проработал вопросы внедрения предлагаемой технологии.

Баранов В.В. исследовал вопросы, связанные с азотированием пассивирующего оксида и с явлениями на границе кремний – оксид кремния.

Дереченник С.С. осуществлял научное руководство проведением исследований, участвовал в анализе полученных результатов, выполнил оценку влияния предложенной технологии на качество диода как источника шума.

Просолович В.С. выполнил анализ физических механизмов формирования термодоноров и геттерирования технологических примесей в высоколегированных структурах.

Authors' contribution

Busliuk V.V. developed the study methodology, studied the effect of annealing on the parameters of noise diodes, performed processing and analysis of the results.

Emelyanov V.A. carried out the formulation of the research problem, worked out the issues of adoption the proposed technology.

Baranov V.V. investigated issues related to the nitriding of the passivating oxide and the phenomena at the silicon-silicon oxide interface.

Derechennik S.S. supervised the research, participated in the analysis of the results obtained, assessed the impact of the proposed technology on the quality of the diode as a noise source.

Prasalovich V.S. performed an analysis of the physical mechanisms of the formation of thermal donors and gettering of technological impurities in highly doped structures.

Сведения об авторах

Буслюк В.В., заведующий лабораторией, доцент кафедры электронных вычислительных машин и систем Брестского государственного технического университета.

Емельянов В.А., д.т.н., профессор, чл.-корр. НАН Беларуси, главный специалист ОАО «ИНТЕГРАЛ».

Баранов В.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Дереченник С.С., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой электронных вычислительных машин и систем Брестского государственного технического университета.

Просолович В.С., к.ф.-м.н., доцент, заведующий НИЛ спектроскопии полупроводников, доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета.

Адрес для корреспонденции

224017, Республика Беларусь,
г. Брест, ул. Московская, 267,
Брестский государственный
технический университет;
тел. +375-162-32-18-10;
e-mail: cm@brest.by
Дереченник Станислав Станиславович

Information about the authors

Busliuk V.V., Laboratory Head and Associate Professor at the Department of Computers and Systems of Brest State Technical University.

Emelyanov V.A., D.Sc., Professor, Corresponding Member of the National Academy of Science of Belarus, Principal Specialist of "INTEGRAL" Joint Stock Company.

Baranov V.V., D.Sc., Professor, Professor at the Department of Information and Computer Systems Design of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Derechennik S.S., PhD, Associate Professor, Head of the Department of Computers and Systems of Brest State Technical University.

Prasalovich V.S., PhD, Associate professor, Head of the Laboratory of Semiconductor Spectroscopy and Associate Professor at the Department of Semiconductor Physics and Nanoelectronics of Belarusian State University.

Address for correspondence

224017, Republic of Belarus,
Brest, Moskovskaya str., 267,
Brest State Technical University;
tel. +375-162-32-18-10
e-mail: cm@brest.by
Derechennik Stanislav Stanislavovich