

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДИОДОВ ГЕНЕРАТОРОВ ШУМА, ОБЛУЧЕННЫХ БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

В. В. Буслюк^{1,2}, С. С. Дереченник¹, В. Б. Оджаев³, В. С. Просолович³,
С. Б. Ластовский⁴, О. О. Латий², Д. Н. Федосюк², В. Ю. Явид³, Ю. Н. Янковский³

¹⁾ УО «Брестский государственный технический университет», ул. Московская, 267,
224017 Брест, Беларусь, e-mail: b_viktor@tut.by

²⁾ ОАО «Цветотрон», ул. Суворова, 96А, 224022 Брест, Беларусь,
e-mail: b_viktor@tut.by

³⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,
e-mail: prosolovich@bsu.by

⁴⁾ НППЦ по материаловедению НАНБ, ул. П.Бровки, 19, 220072 Минск, Беларусь,
e-mail: lastov@iftp.bas-net.by

Исследованы изменения электрофизических параметров кремниевых диодов-генераторов шума ND103L, при облучении быстрыми электронами с энергией 5 МэВ дозами $3 \times 10^{13} - 1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Установлено, что в процессе облучения диодов генераторов шума происходят коррелированные изменения их основных электрофизических характеристик: обратного тока $p-n$ -перехода, эффективного напряжения шума, спектральной плотности напряжения шума и граничной частоты шумов. Это обусловлено как активацией в процессе облучения исходных (не активированных) центров, на которых сформировались микроплазмы, так и образованием новых очагов формирования микроплазм. При флюенсах более $1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ возрастает концентрация радиационных дефектов, что приводит к уменьшению времени жизни неравновесных носителей заряда, увеличению обратного тока диодов, а также уменьшению эффективного напряжения шума и спектральной плотности напряжения шума.

Ключевые слова: диоды генераторы шума; быстрые электроны; электрофизические параметры; микроплазмы.

ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF DIODES OF NOISE GENERATORS IRRADIATED WITH FAST ELECTRONS

V. V. Buslyuk^{1,2}, S. S. Derechennik¹, V. B. Odzaev³, V. S. Prosolovich³,
S. B. Lastovski⁴, O. O. Latij², D. N. Fedosuyk², V. Yu. Yavid³, Yu. N. Yankovski³

¹⁾ National Technical University of Brest, Moskovskaya st., 267, 224017 Brest, Belarus

²⁾ JSC «Tsvetotron», Suvorova, 96A, 224022 Brest, Belarus

³⁾ Belarusian State University, Nezavisimosti av., 4, 220030 Minsk, Belarus

⁴⁾ Scientific-Practical Materials Research Centre NAS of Belarus, P.Brovki, 19, 220072 Minsk, Belarus
Corresponding author: V. S. Prosolovich (prosolovich@bsu.by)

Changes in the electrophysical parameters of silicon diodes-noise generators ND103L when irradiated with fast electrons with an energy of 5 MeV in doses of $3 \times 10^{13} - 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ were studied. It has been established that in the process of irradiating the diodes of noise generators, correlated changes in their main electrophysical characteristics occur: the reverse current of the $p-n$ -junction, the effective noise voltage, the spectral

density of the noise voltage and the boundary frequency of noise. This is due to both the activation during irradiation of the original (not activated) centers on which microplasmas formed, and the formation of new foci of microplasma formation. At fluences of more than $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, the concentration of radiation defects increases, which leads to a decrease in the lifetime of nonequilibrium charge carriers, an increase in the reverse current of diodes, as well as a decrease in the effective noise voltage and spectral density of the noise voltage.

Key words: diodes noise generators; fast electrons; electrophysical parameters; microplasmas.

ВВЕДЕНИЕ

Управление движением нанообъектов лазерным излучением – один из перспективных способов манипулирования наночастиц в кровезамещающих жидкостях. Хорошо известно, что световое давление, вызванное сфокусированным лазерным лучом [1], позволяют захватывать объекты и производить манипуляцию с ними в среде с силами, которые зависят от оптических свойств не только нанообъектов, но и самой среды [2–5]. В данной работе рассматривается движение золотой сферической наночастицы, находящейся в физиологическом растворе NaCl 0,9 %, под действием силы светового давления. Представлены графические зависимости составляющих силы светового давления, действующих на металлическую наночастицу, в зависимости от положения центра масс наночастицы.

Для оценки качества цифровых систем передачи информации, маскирования побочных электромагнитных излучений вычислительной техники, создания криптографически случайных числовых последовательностей в аппаратно-программных комплексах защиты информации требуется генерация шума с заданными спектральными характеристиками в широком диапазоне частот. В качестве источников шума используются полупроводниковые диоды, генерирующие широкополосный шум с высокой спектральной плотностью в режиме обратного смещения.

Принцип действия генераторов шума основан на свойствах лавинного пробоя p – n -перехода. В начальной стадии лавинного пробоя процесс ударной ионизации оказывается неустойчивым: ударная ионизация возникает, срывается, возникает вновь в тех местах перехода, где оказывается достаточная напряженность электрического поля. Результатом случайной неравномерности генерации новых носителей заряда являются шумы, которые характерны для определенного диапазона токов. В полупроводниковых диодах причинами возникновения шума являются микроплазменные образования [1, 2]. Микроплазмы образуются благодаря малым примесно-дефектным неоднородностям структуры в области пространственного заряда (ОПЗ) p – n -переходов.

В связи с тем, что шумовые свойства полупроводниковых приборов зависят от состава и постоянства дефектно-примесной структуры, инженерия дефектов позволяет управлять их электрическими параметрами. Ранее было показано, что подбором соответствующих режимов отжига диодов и среды его проведения может быть обеспечена стабилизация остаточных точечных дефектов на финишных этапах изготовления приборов и оптимизация их эксплуатационных характеристик [3]. Модификация дефектно-примесного ансамбля полупроводниковых структур может быть достигнута также при высокоэнергетических внешних воздействиях. С этой целью было исследовано изменение электрофизических параметров диодов генераторов шума при облучении быстрыми электронами с энергией 5 МэВ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Диоды генераторы шума ND103L изготавливались по планарной диффузионной технологии на основе монокристаллического кремния p -типа, $\rho = 0.03 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, ориентацией (111). Глубина p - n -перехода, сформированного диффузией фосфора, составляла $\sim 6 \text{ мкм}$. Измерения вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик (ВАХ и ВФХ) производились с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A и зондовой станции Cascade Summit11000 в интервале температур $-60^\circ\text{C} - 125^\circ\text{C}$. Облучение электронами с энергией 5 МэВ выполнялось дозами (Φ) $3 \times 10^{13} - 1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Измерения шумовых характеристик осуществлялись на автоматизированном комплексе измерения электрических параметров шумовых диодов АКЖД.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Измерения ВАХ показали, что для всех диодов до облучения обратные ветви имеют активационный характер. При построении их в двойном логарифмическом масштабе имеет место наличие двух областей. При $U < 2 \text{ В}$ ток практически не зависит от напряжения, что свидетельствует о преобладании в данной области диффузионного тока. При $U > 2 \text{ В}$ наблюдается степенная зависимость тока от напряжения $I_r \sim U^n$ с $n > 1$, что свидетельствует о высокой концентрации рекомбинационно-генерационных центров и их неоднородном распределении [4]. Установлено, что зависимость емкости от приложенного обратного смещения имеет вид $1/C^3 \sim U_{\text{обр}}$ и характерна для плавного p - n -перехода [4].

В процессе облучения величины обратных токов при всех значениях обратного напряжения существенно возрастали (рис. 1), однако качественно вид вольт-амперных характеристик существенных изменений не претерпевал.

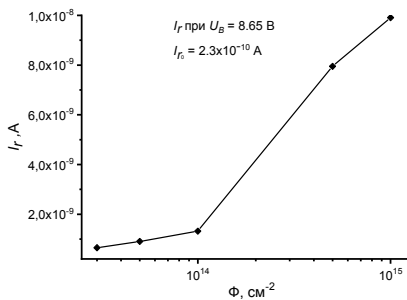


Рис. 1. Зависимость обратного тока p - n -переходов от флюенса облучения быстрыми электронами ($U_B = 8,65 \text{ В}$)

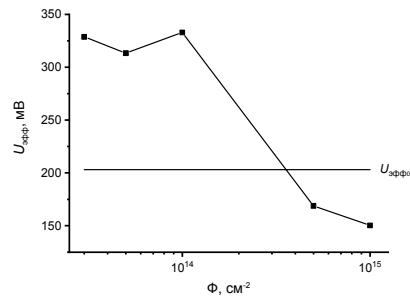


Рис. 2. Зависимость эффективного напряжения шума от флюенса облучения быстрыми электронами (сплошной линией показано значение $U_{\text{эфф}0}$ до облучения)

Как известно [4], ток через p - n -переход при обратном смещении, обусловленный генерационно-рекомбинационными процессами в области пространственного заряда, определяется, прежде всего, шириной области обеднения W и временем жизни неравновесных носителей заряда τ_e , т.е. концентрацией генерационных центров:

$$J_{gen} = \int_0^W q|U|dx \approx q|U|W = \frac{qn_iW}{\tau_e},$$

где q – заряд носителей заряда, n_i – собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике, U – величина напряжения обратного смещения.

Установлено, что после облучения электронами ВФХ исследуемых приборов практически не изменялись, т.е. размеры области пространственного заряда вблизи металлургической границы p - n -перехода не претерпевали существенных изменений. Таким образом, увеличение обратного тока после облучения может быть обусловлено только уменьшением времени жизни неравновесных носителей вследствие образования при воздействии ионизирующего излучения радиационных дефектов, являющихся глубокими генерационно-рекомбинационными центрами. Следует отметить, однако, что в диапазоне флюенсов $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2} - 1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ облучение приводит к незначительному изменению обратного тока I_r при напряжении, при котором начинается пробой ($U_B = 8.65 \text{ В}$), а при дальнейшем увеличении флюенса I_r резко возрастает.

Измерения шумовых характеристик диодов показали, что эффективное напряжения шума ($U_{эфф}$) в диапазоне флюенсов облучения быстрыми электронами $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2} - 3 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ приводит даже при самом малом флюенсе ($3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$) к увеличению $U_{эфф}$ по сравнению с его исходным значением. Данная величина остается практически постоянной вплоть до $1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$, а затем резко уменьшается до значений ниже величины $U_{эфф}$ в диодах до облучения. Следует отметить небольшой прогиб зависимости вниз для флюенса $5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$. На рис. 3 представлена зависимость спектральной плотности шумов, определяемой как плотность шума в сигнале, относящейся к полосе пропускания в 1 Гц, от флюенса облучения быстрыми электронами.

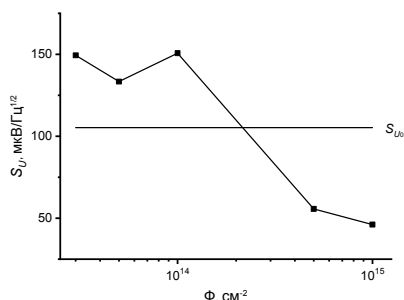


Рис. 3. Зависимость спектральной плотности напряжения шума от флюенса облучения быстрыми электронами (сплошной линией показано значение S_U до облучения)

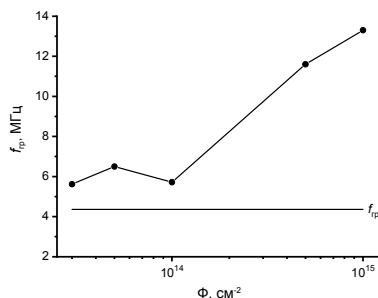


Рис. 4. Зависимость граничной частоты шумов при токе 50 мкА от флюенса облучения быстрыми электронами (сплошной линией показано значение $f_{гр}$ до облучения)

Наблюдается хорошая корреляция с аналогичной зависимостью эффективного напряжения шума: величина остается практически постоянной вплоть до флюенса $1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$, а затем резко уменьшается до значений ниже величины S_U в диодах до облучения.

На рис. 4 представлена зависимость от флюенса облучения быстрыми электронами граничной частоты шумов при токе 50 мкА, определяемой как наибольшая частота спектра, при которой отрицательное отклонение спектральной плотности шумов при заданном токе пробоя не превышает заданное значение. В данном случае также наблюдается хорошая корреляция с соответствующими зависимостями для $U_{\text{эфф}}$ и S_U : величина $f_{\text{гр}}$ остается практически постоянной вплоть до флюенсов $1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$, а затем резко увеличивается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, в процессе облучения диодов генераторов шума происходят коррелированные изменения их основных электрофизических характеристик: обратного тока p – n -перехода, эффективного напряжения шума, спектральной плотности напряжения шума и граничной частоты шумов при токе 50 мкА, которые определяются структурой и свойствами микроплазм. Микроплазменные образования в области пространственного заряда p – n -перехода, расположенные на неоднородностях структуры и различного вида дефектах, являются основными причинами возникновения шума. В процессе облучения происходит как активация исходных (не активированных) центров, на которых сформировались микроплазмы в процессе изготовления приборов, так и образование новых очагов формирования микроплазм. До флюенса $1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ доминирует активация исходных центров, что приводит к увеличению $U_{\text{эфф}}$, S_U и $f_{\text{гр}}$, а также небольшому снижению I_r вследствие формирования центров генерации радиационного происхождения. При дальнейшем росте флюенса концентрация радиационных дефектов, формирующих глубокие уровни в запрещенной зоне, возрастает, что приводит к уменьшению времени жизни неравновесных носителей заряда вследствие увеличения вероятности их рекомбинации на глубоких уровнях. Это обуславливает с одной стороны увеличение обратного тока диодов, а с другой стороны уменьшение эффективного напряжения шума и спектральной плотности напряжения шума.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Электрофизические параметры генераторных диодов для создания широкополосного шума/ В.В. Буслюк [и др.] // Журнал Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2017. – № 1. – С. 95–99.
2. Physical Parameters of the Broadband Noise-Generator Diodes / V.V. Buslyuk [et al.]// Russian Microelectronics. – 2020. – Vol. 49, № 4. – P. 295–301.
3. Стабилизация шумовых параметров при отжиге высоколегированных структур диодов-генераторов шума/ В.В. Буслюк [и др.] // Доклады БГУИР. – 2021. – Т. 19, № 6. – С. 32–41.
4. Semiconductor Devices: Physics and Technology / S.M. Sze, M.K. – Lee 3rd ed. John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited, 2012. –582 p.