

Раздел III. Электроника, связь и навигация

УДК 621.315.592

DOI 10.18522/2311-3103-2022-4-213-221

Н.М. Богатов, В.С. Володин, Л.Р. Григорьян, А.И. Коваленко, М.С. Коваленко

ИМПУЛЬСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР С N-P ПЕРЕХОДОМ, ОБЛУЧЕННЫХ ПРОТОНАМИ

В настоящее время активно развиваются методы создания полупроводниковых структур с заданными свойствами с помощью облучения ионизирующими частицами (инженерия радиационных дефектов). Взаимодействие радиационных дефектов с примесями, дислокациями и другими дефектами структуры обуславливает изменение свойств полупроводников и полупроводниковых приборов. Облучение протонами позволяет контролируемо создавать радиационные дефекты с максимумом распределения в заранее рассчитанной области. Цель работы – анализ влияния облучения низкоэнергетическими протонами на импульсные характеристики кремниевых структур с n^+ -р переходом. Задача – определение эффективного времени жизни τ носителей заряда в области пространственного заряда (ОПЗ) n^+ -р перехода. Исследовались n^+ -р-р⁺-структуры из кремния, выращенного методом Чохральского, облучённые со стороны n^+ -слоя потоком низкоэнергетических протонов при температуре образцов 300 К и 83 К. Для измерения импульсных характеристик использовались биполярные прямоугольные импульсы напряжения с постоянной амплитудой 10 мВ и частотой 1 МГц. Экспериментальные данные объясняются с помощью моделей нестационарного переноса носителей заряда в неоднородных полупроводниках и образования радиационных дефектов в кремнии под действием протонов. Рассчитаны распределения по глубине среднего числа первичных радиационных дефектов: междоузельного кремния, вакансий, дивакансий, созданных одним протоном на единице длины проективного пробега. Показано, что облучение протонами с дозой 10^{15} см⁻² и энергией 40 keV не изменяет значение τ , а с энергией 180 keV создает в ОПЗ n^+ -р перехода область с эффективным временем жизни $5.5 \cdot 10^{-8}$ с.

Кремний; n^+ -р переход; время жизни; протон.

N.M. Bogatov, V.S. Volodin, L.R. Grigoryan, A.I. Kovalenko, M.S. Kovalenko

IMPULSE CHARACTERISTICS OF SILICON STRUCTURES WITH N-P JUNCTION IRRADIATED BY PROTONS

Currently, methods are being actively developed to create semiconductor structures with desired properties by irradiation with ionizing particles (radiation defect engineering). The interaction of radiation defects with impurities, dislocations and other structural defects causes a change in the properties of semiconductors and semiconductor devices. Irradiation with protons makes it possible to controllably create radiation defects with a distribution maximum in a pre-calculated region. The aim of this work is to analyze the effect of irradiation with low-energy protons on the impulse characteristics of silicon structures with an n^+ -p junction. The task is to determine the effective lifetime τ of charge carriers in the space charge region (SCR) of the n^+ -p junction. The n^+ -p-p⁺-structures made of silicon grown by the Czochralski method, irradiated from the side of the n+-layer by a low-energy proton flux at sample temperatures of 300 K and 83 K were studied. To measure the impulse characteristics, bipolar rectangular voltage pulses with a constant amplitude of 10 mV and a frequency of 1 MHz were used. The experimental data are explained using models of nonstationary charge carrier transport in inhomogeneous semiconductors and the formation of radiation defects in silicon under

the action of protons. Depth distributions of the average number of primary radiation defects are calculated: interstitial silicon, vacancies, divacancies created by one proton per unit length of the projective path. It is shown that irradiation with protons with a dose of 10^{15} cm^{-2} and an energy of 40 keV does not change the value of τ , but with an energy of 180 keV creates a region with an effective lifetime of $5.5 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ in the SCR of the n^+ - p junction.

Silicon; n^+ - p junction; lifetime; proton.

Введение. Создание полупроводниковых структур с заданными свойствами с помощью облучения ионизирующими частицами (инженерия радиационных дефектов) – актуальное направление полупроводниковой технологии [1]. Взаимодействие примесей, радиационных дефектов, дислокаций обуславливает изменение свойств полупроводников и полупроводниковых приборов [2–5].

Свойства радиационных дефектов зависят от типа ионизирующих частиц, дозы облучения, концентрации основных примесей. Приборы микро и нанoeлектроники чувствительны к изменениям свойств поверхностной области, вызванным протонами. Облучение протонами позволяет контролируемо изменять свойства структур на глубине от 0,1 мкм до 1 мм [6].

Технологии протонного облучения полупроводниковых приборов позволяют селективно вводить центры рекомбинации в кремниевые структуры, уменьшать эффективное время жизни носителей заряда в скрытых слоях, создавать слои с водород содержащими центрами [7]. Образовавшийся в результате имплантации ионов водорода нарушенный слой неоднороден, интегральные характеристики нарушенного слоя исследованы в [8].

Таким образом, определение эффективного времени жизни τ носителей заряда в области накопления радиационных дефектов является актуальной задачей.

Для измерения времени жизни неравновесных носителей заряда в кремнии с учетом влияния поверхностной рекомбинации используются измерения спада фотопроводимости [9, 10]. Бесконтактные измерения времени жизни с помощью регистрируемой микроволновым излучением фотопроводимости используются для контроля результатов технологических воздействий [11]. Для определения влияния структурных дефектов на объемную составляющую времени жизни неосновных носителей заряда и скорости рекомбинации в p - n -переходе в двухстороннем солнечном элементе из поликристаллического кремния применяется импульсное освещение [12].

Чтобы исключить временную зависимость фототока и фотопроводимости, использующуюся в методиках [9–12], в [13] измерялось переходное напряжение в неосвещенных кремниевых n^+ - p - p^+ структурах, облученных низкоэнергетическими протонами.

Цель работы – анализ влияния облучения низкоэнергетическими протонами на импульсные характеристики кремниевых структур с n - p -переходом.

Методика исследования. Экспериментально исследовались 10 образцов с n^+ - p - p^+ -структурой из кремния, выращенного методом Чохральского, с удельным сопротивлением базы p -типа $\rho = 10 \text{ }\Omega\text{-cm}$ и концентрацией равновесных дырок $p_0 \approx 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, глубиной диффузионных n^+ - p и p - p^+ -переходов $d_n \approx d_p \approx 0,45 \text{ }\mu\text{m}$, толщиной $L \approx 200 \text{ }\mu\text{m}$. Поверхностная концентрация фосфора составляла $N_p \approx 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, бора – $N_B \approx 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Образцы площадью $S \approx 1 \text{ cm}^2$ были получены лазерным разделением фотоэлектрических преобразователей площадью $S \approx 100 \text{ cm}^2$, содержащих контактную систему в виде решетки на лицевой и тыльной поверхностях, с помощью твердотельного ИАГ-лазера в импульсном режиме работы. Лазерная обработка торцов минимизирует токи утечки по торцам.

Образцы облучались со стороны p^+ -слоя потоком протонов с энергией $E_p = 40 \text{ keV}$, $E_p = 180 \text{ keV}$ и дозой $F_p = 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ при температуре образцов $T_p = 300 \text{ K}$, $T_p = 83 \text{ K}$ на имплантере Extrion/Varian: №1 – $E_p = 180 \text{ keV}$, $T_p = 83 \text{ K}$; №2 – $E_p = 40 \text{ keV}$, $T_p = 83 \text{ K}$; №3 – $E_p = 40 \text{ keV}$, $T_p = 300 \text{ K}$. Контрольная группа из 7 образцов, имеющих очень близкие электрофизические характеристики, №4 не облучалась.

Импульсные характеристики измерялись с помощью цифрового осциллографа DSOX2022A, реализующего функции генератора импульсов напряжения и мультиметра. Принципиальная электрическая схема показана на рис. 1. Для определения времени переключения использовались биполярные прямоугольные импульсы напряжения с постоянной амплитудой $U_m = 10 \text{ mV}$ и частотой $f = 1 \text{ MHz}$. Зависимость напряжения U от времени для исследуемых образцов измерялась в темноте.

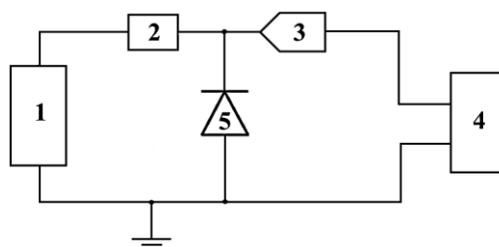


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема: 1 – генератор импульсов напряжения, 2 – кабель сопротивлением $R = 0,1 \text{ Ом}$, 3 – высокочастотный щуп $f_{max} = 300 \text{ MHz}$, 4 – осциллограф, 5 – исследуемый образец

Паспортные данные осциллографа DSOX2022A: в режиме сбора данных разрешение по напряжению $0,01 \text{ mV}$ с погрешностью 4%, максимальное временное разрешение 5 ps , входное сопротивление 1 MOm , входная емкость 18 pF . Длительность импульса составляла $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ s}$, шаг дискретизации измеряемого сигнала – $2,5 \text{ ns}$. При этих параметрах эксперимента измеряемое время переключения τ должно находиться в пределах $5 \cdot 10^{-9} \text{ s} < \tau < 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ s}$. Измерения проводились при температуре $T = 300 \text{ K}$, так что выполняется неравенство

$$eU_m / kT < 1, \quad (1)$$

где e – элементарный заряд, k – постоянная Больцмана. В этом случае импульсные характеристики исследуемых структур симметричны при переключении напряжения (рис. 2). Зависимости $U(t)$ для образцов №2, №3, №4 отличаются мало. Переходные процессы не успевают завершиться, поэтому функции $U(t)$ не выходят на насыщение.

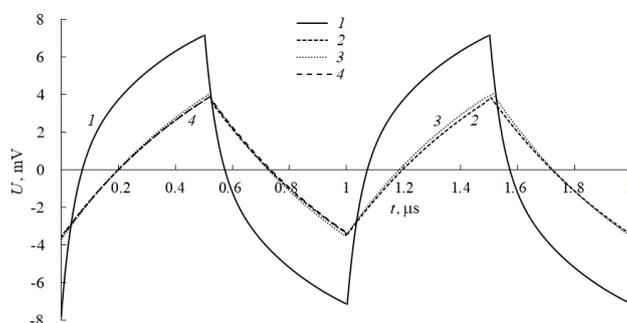


Рис. 2. Импульсные характеристики при частоте импульсов 1 MHz : 1 – образец №1, 2 – образец №2, 3 – образец №3, 4 – образец №4

Темновые стационарные вольтамперные характеристики (ВАХ), измеренные с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-1 в диапазоне напряжений $-10 \text{ mV} < U < 10 \text{ mV}$, линейны для всех образцов. Эффективное сопротивление образцов $R_{ef} = dU/dI$, рассчитанное по темновым ВАХ в этом диапазоне напряжений, принимает значения: №1 – 5586 Ом, №2 – 32258 Ом, №3 – 26315 Ом, №4 – 41841 Ом.

В работах [14, 15] в результате анализа темновых ВАХ, измеренных в диапазоне $U < 0,6 \text{ В}$, определены значения шунтирующего сопротивления R_{sh} и сосредоточенного последовательного сопротивления R_s образцов. Значения R_{sh} : №1 – $1.2 \cdot 10^5 \text{ Ом}$, №2 – $1.1 \cdot 10^5 \text{ Ом}$, №3 – $1.1 \cdot 10^5 \text{ Ом}$, №4 – $3.4 \cdot 10^5 \text{ Ом}$. Значения R_s : №1 – 3.1 Ом, №2 – 2.3 Ом, №3 – 2.2 Ом, №4 – 4.2 Ом. Для всех образцов значения $R_{sh} > R_{ef}$, следовательно, время переключения для зависимостей $U(t)$ на рис. 2 не определяется токами утечки по торцам n - p перехода.

Переходные характеристики, измеренные по схеме рис. 1 без исследуемого образца, имеют время нарастания фронта импульса $t_{f0} = 27.5 \text{ ns}$. Если вместо исследуемых образцов включить омические сопротивления с $R = R_{ef}$, то время нарастания фронта импульса $t_f < t_{f0}$. Следовательно, значения времени переключения, характерные для рис. 2, не определяются параметрами измерительной цепи. Наблюдаемые переходные процессы обусловлены явлениями в n^+p -структурах.

Неравенство (1) позволяет полностью линеаризовать фундаментальную систему дифференциальных уравнений Шокли [16] транспорта носителей заряда в неоднородных полупроводниках в одномерном нестационарном случае.

В n области уравнение диффузионного распространения неравновесных дырок δp :

$$\frac{\partial \delta p}{\partial t} - D_p \frac{\partial^2 \delta p}{\partial x^2} + \frac{\delta p}{\tau_p} = 0, \quad (2)$$

где D_p – коэффициент диффузии, τ_p – время жизни дырок.

В p области уравнение диффузионного распространения неравновесных электронов δn :

$$\frac{\partial \delta n}{\partial t} - D_n \frac{\partial^2 \delta n}{\partial x^2} + \frac{\delta n}{\tau_n} = 0, \quad (3)$$

где D_n – коэффициент диффузии, τ_n – время жизни электронов.

В области пространственного заряда (ОПЗ) n - p перехода со стороны n слоя уравнение диффузионно-дрейфового распространения неравновесных дырок:

$$\frac{\partial \delta p}{\partial t} + \frac{e\mu_p}{\varepsilon\varepsilon_0} N_D^+ \left(\delta p + (x + d_n) \frac{\partial \delta p}{\partial x} \right) - D_p \frac{\partial^2 \delta p}{\partial x^2} + \frac{\delta p}{\tau_p} = 0, \quad (4)$$

где μ_p – подвижность дырок, N_D^+ – концентрация ионизованных доноров в этой области, ε – диэлектрическая проницаемость, ε_0 – диэлектрическая постоянная, d_n – левая граница ОПЗ.

В ОПЗ со стороны p области уравнение диффузионно-дрейфового распространения неравновесных электронов:

$$\frac{\partial \delta n}{\partial t} + \frac{e\mu_n}{\varepsilon\varepsilon_0} N_A^+ \left(\delta n + (x - d_p) \frac{\partial \delta n}{\partial x} \right) - D_n \frac{\partial^2 \delta n}{\partial x^2} + \frac{\delta n}{\tau_n} = 0, \quad (5)$$

где μ_n – подвижность электронов, N_A^+ – концентрация ионизованных акцепторов в этой области, d_p – правая граница ОПЗ. В уравнениях (4, 5) использовалась модель резкого n - p перехода [17].

Краевые условия для уравнений (2–5) учитывают рекомбинацию носителей заряда на внешних поверхностях, падение напряжения в n - p переходе. На границах ОПЗ решения в соседних областях сшиваются. Неравенство (1) позволяет линеаризовать задачу, поэтому частное решение уравнений (2–5) ищем в виде

$$\delta n(x,t) = A_n(x) - B_n(x) \cdot \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right), \text{ при } t_0 \leq t \leq t_m, \quad (6)$$

$$\delta p(x,t) = A_p(x) - B_p(x) \cdot \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right), \text{ при } t_0 \leq t \leq t_m, \quad (7)$$

где функции $A_n(x)$, $B_n(x)$, $A_p(x)$, $B_p(x)$ найдем, решая уравнений (2–5) с краевыми условиями методом разделения переменных. Суперпозиция решений вида (6), (7) с различными значениями τ также является решением уравнений (2–5), соответствующим условиям эксперимента. Полученные формулы громоздки, приводить их в статье не целесообразно.

Падение напряжения на сосредоточенном последовательном сопротивлении R_s много меньше U , поэтому падение напряжения в ОПЗ n - p перехода $U_{np}(t) \approx U(t)$. Совместность решений уравнений (2–5) и экспериментальных данных требует, чтобы

$$U_{np}(t) = A_1(a_1 e^{-(t-t_0)/\tau_1} + a_2 e^{-(t-t_0)/\tau_2}) - A_2, \quad (8)$$

где $t_0 \leq t \leq t_0 + 0.5 \cdot 10^{-6}$ s, t_0 – начало отсчета совпадает с фронтом изменения напряжения, постоянные A_1 , A_2 , a_1 , a_2 , τ_1 , τ_2 найдем, аппроксимируя экспериментальные зависимости, представленные на рис. 2.

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты измерений обрабатывались с помощью программ Excel и Mathcad. Импульсные характеристики исследуемых структур с достаточной точностью аппроксимируются одно экспоненциальной зависимостью напряжения от времени ($a_2 = 0$ в (8)) для образцов №2, №3, №4, а для образца №1 – двух экспоненциальной зависимостью (8). В результате найдены следующие значения времени переключения для образцов: №2 – $\tau_1 = 6.6 \cdot 10^{-7}$ s, №3 – $\tau_1 = 6.3 \cdot 10^{-7}$ s, №4 – $\tau_1 = 6.4 \cdot 10^{-7}$ s. Для образца №1 найдены два значения $\tau_1 = 4.2 \cdot 10^{-7}$ s, $\tau_2 = 5.5 \cdot 10^{-8}$ s.

Для объяснения полученных значений времени переключения воспользуемся моделью образования первичных радиационных дефектов (ПРД) в кремнии [18–20]. На рис. 3 показаны рассчитанные распределения по глубине среднего числа ПРД: G_{Si} – междоузельного кремния, G_V – вакансий, G_W – дивакансий, созданных одним протоном на единице длины проективного пробега.

Количество ПРД, созданных в n^+ -слое на расстоянии 0.41 μm от поверхности протонами с $E_p = 40$ keV при $T_p = 83$ K и $T_p = 300$ K, отличается в несколько раз. Однако значения τ в облученных №2, №3 и необлученном №4 образце близки и, следовательно, не могут быть временем жизни дырок в n^+ -слое. Эти значения много меньше времени жизни электронов в базе p -типа. Поэтому считаем, что измеренные зависимости $U(t)$ определяются падением напряжения в ОПЗ n^+ - p перехода, а значения τ являются эффективным временем жизни носителей заряда в этой области.

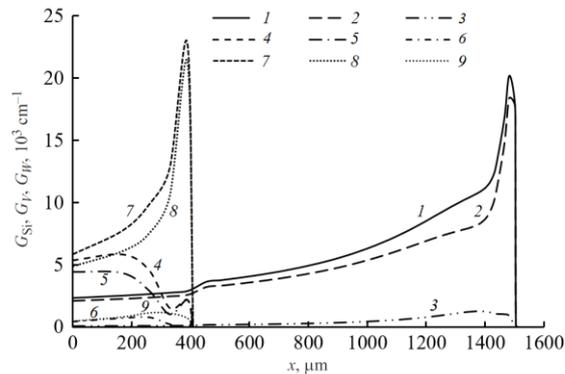


Рис. 3. Распределение среднего числа ПРД, созданных на единицу длины проективного пробега одним протоном: $E_p = 180 \text{ keV}$, $T_p = 83 \text{ K}$: 1 – G_{Si} , 2 – G_V , 3 – G_W ; $E_p = 40 \text{ keV}$, $T_p = 83 \text{ K}$: 4 – G_{Si} , 5 – G_V , 6 – G_W ; $E_p = 40 \text{ keV}$, $T_p = 300 \text{ K}$: 7 – G_{Si} , 8 – G_V , 9 – G_W

Протоны с $E_p = 180 \text{ keV}$ создают ПРД на глубине $1.51 \mu\text{m}$ во всей ОПЗ n^+ -р перехода (рис. 3). Следовательно, структура ОПЗ образца №1 изменилась, в ней существуют две области с различными значениями эффективного времени жизни τ_1 и τ_2 . Значение τ_2 относится к области с высокой концентрацией радиационных дефектов в окрестности пика Брэгга, расположенного при $x = 1.48 \mu\text{m}$ (рис. 3).

Заключение. В кремниевой структуре протоны с энергией 180 keV создают ПРД в слое толщиной $1.51 \mu\text{m}$, а протоны с энергией 40 keV – в слое толщиной $0.41 \mu\text{m}$. При температуре облучения образцов 83 K количество ПРД в пике распределения в конце проективного пробега протона с $E_p = 40 \text{ keV}$ оказывается много меньше, чем для протона с $E_p = 180 \text{ keV}$, что обусловлено различием процессов разделения пар Si_i , V в кремнии n - и p -типа проводимости. Облучение протонами с $E_p = 180 \text{ keV}$ изменяет физические свойства высоколегированного слоя n^+ -типа и всей ОПЗ n^+ -р перехода. Протоны с $E_p = 40 \text{ keV}$ изменяют свойства слоя n -типа, не воздействуя на ОПЗ, если глубина залегания n^+ -р перехода превышает среднюю длину проективного пробега протона. Эти выводы подтверждаются экспериментальными исследованиями вольтамперных характеристик и спектров пропускания кремниевых структур с n^+ -р переходом [14, 15].

Анализ импульсных характеристик показывает, что в результате облучения протонами с энергией 180 keV и дозой 10^{15} cm^{-2} изменились свойства ОПЗ n^+ -р перехода так, что образовались две области с различными значениями эффективного времени жизни $\tau_1 = 4.2 \cdot 10^{-7} \text{ s}$, $\tau_2 = 5.5 \cdot 10^{-8} \text{ s}$. Таким образом, время переключения снизилось на порядок по сравнению с необлученными образцами.

Благодарности. Авторы благодарят сотрудников ФГБУН Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук Ю.А. Агафонова, В.И. Зиненко за облучение образцов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Челябинский А.Р., Комаров Ф.Ф. Дефектно-примесная инженерия в имплантированном кремнии // Успехи физических наук. – 2003. – Т. 173, № 8. – С. 813-846.
2. Lebedev A.A., Davydov V.Yu., Smirnov A.N., Eliseyev I.A., Davydovskaya K.S., Zavarin E.E., Zakheim D.A., Lundin W.V., Nikolaev A.E., Sakharov A.V., Tsatsulnikov A.F., Zubov A.V., Kozlovski V.V. Proton irradiation effects on GaN-based epitaxial structures // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. 1697, 012073. – P. 1-6.

3. Брудный В.Н. Радиационные эффекты в полупроводниках // Вестник Томского государственного университета. Серия "Физика". – 2005. – № 285: – С. 95-102.
4. Соболев Н.А. Инженерия дефектов в имплантационной технологии кремниевых светоизлучающих структур с дислокационной люминесценцией // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44, В. 1. – С. 3-25.
5. Les P.A. Evolution of space solar cells // Solar Energy Materials & Solar Cells. – 2001. – Vol. 68, I. 1. – P. 1-13.
6. Козлов В.А., Козловский В.В. Легирование полупроводников радиационными дефектами при облучении протонами и α -частицами // Физика и техника полупроводников. – 2001. – Т. 35, В. 7. – С. 769-795.
7. Губарев В., Семенов А., Сурма А., Столбунов В. Технология протонного облучения и возможности ее применения для улучшения характеристик силовых диодов и тиристоров // «Протон-Электротекс». – URL: https://proton-electrotex.com/files/project_52/15_Protonnoe_obluchenie_rus.pdf (дата публикации 29.11.2011).
8. Асадочиков В.Е., Дьячкова И.Г., Золонов Д.А., Кривонос Ю.С., Бублик В.Т., Шихов А.И. О связи протонного облучения и термической обработки монокристаллического кремния с его структурой // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 18-26.
9. Anfimov I.M., Kobeleva S.P., Pylnev A.V., Schemerov I.V., Egorov D. S., Yurchuk S.Yu. On the Problem of Determining the Bulk Lifetime by Photoconductivity Decay on the Unpassivated Samples of Monocrystalline Silicon // Russian Microelectronics. – 2017. – Vol. 46, No. 8. – P. 585-590.
10. Koshelev O.G., Vasiljev N.G. Separate determination of the photoelectric parameters of $n^+p(n)-p^+$ silicon structure base region by noncontact method based on measurements of quantum efficiency relationships at two wavelengths // Modern Electronic Materials. – 2017. – Vol. 3, No. 3. – P. 127-130.
11. Bscheid C., Engst C.R., Eisele I., Kutter C. Minority Carrier Lifetime Measurements for Contactless Oxidation Process Characterization and Furnace Profiling // Materials. – 2019. – Vol. 12, No. 1. – P. 1-13.
12. Sam R., Zouma B., Zougmore F., Koalaga Z., Zougrana M., Zerbo I. 3D determination of the minority carrier lifetime and the p-n junction recombination velocity of a polycrystalline silicon solar cell // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2012. – Vol. 29, No. 012018. – P. 1-8.
13. Богатов Н.М., Григорьян Л.Р., Коваленко А.И., Коваленко М.С., Лунин Л.С. Импульсные характеристики кремниевых фотоэлектрических преобразователей, облученных низкоэнергетическими протонами // Письма в ЖТФ. – 2021. – Т. 47, В. 7. – С. 10-12.
14. Агафонов Ю.А., Богатов Н.М., Григорьян Л.Р., Зиненко В.И., Коваленко А.И., Коваленко М.С., Колоколов Ф.А. Влияние радиационных дефектов, созданных низкоэнергетическими протонами в сильнолегированном слое, на характеристики кремниевых n^+p-p^+ -структур // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2018. – № 10. – С. 86-91.
15. Богатов Н.М., Григорьян Л.Р., Коваленко А.И., Коваленко М.С., Колоколов Ф.А., Лунин Л.С. Влияние радиационных дефектов, созданных низкоэнергетическими протонами при температуре 83 К, на характеристики кремниевых фотоэлектрических структур // Физика и техника полупроводников. – 2020. – Т. 54, В. 2. – С. 144-149.
16. Shockley W. The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors // Bell Syst. Tech. J. – 1949. – Vol. 28, No. 7. – P. 435-439.
17. Pulfrey D.L. Understanding Modern Transistors and Diodes. – Cambridge University Press, 2010. – 335 p.
18. Богатов Н.М. Радиационные дефекты в кремнии, выращенном методом Чохральского // Поверхность. – 1999. – № 3. – С. 72-78.
19. Bogatov N.M., Kovalenko M.S. Calculation of Frenkel Pairs Separation, Formed in Silicon as a Result of Ionizing Particles Irradiation // AASCIT Journal of Physics. – 2017. – Vol. 3, I. 3. – P. 13-17.
20. Богатов Н.М., Григорьян Л.Р., Кленевский А.В., Коваленко М.С. Моделирование областей разупорядочения в процессе радиационного дефектообразования // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2019. – Т. 16, № 1. – С. 59-65.

REFERENCES

1. *Chelyadinskiy A.R., Komarov F.F.* Defektno-primesnaya inzheneriya v implantirovannom kremnii [Defect-impurity engineering in implanted silicon], *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Successes of Physical Sciences], 2003, Vol. 173, No. 8, pp. 813-846.
2. *Lebedev A.A., Davydov V.Yu., Smirnov A.N., Eliseyev I.A., Davydovskaya K.S., Zavarin E.E., Zakheim D.A., Lundin W.V., Nikolaev A.E., Sakharov A.V., Tsatsulnikov A.F., Zubov A.V., Kozlovski V.V.* Proton irradiation effects on GaN-based epitaxial structures, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1697, 012073, pp. 1-6.
3. *Brudnyy V.N.* Radiatsionnye efekty v poluprovodnikakh [Radiation effects in semiconductors], *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Fizika"* [Bulletin of Tomsk State University. Series "Physics"], 2005, No. 285, pp. 95-102.
4. *Sobolev N.A.* Inzheneriya defektov v implantatsionnoy tekhnologii kremnievykh svetoizluchayushchikh struktur s dislokatsionnoy lyuminestsentsiei [Engineering of defects in implantation technology of silicon light-emitting structures with dislocation luminescence], *Fizika i tekhnika polu-provodnikov* [Physics and technology of semi-conductors], 2010, Vol. 44, V. 1, pp. 3-25.
5. *Iles P.A.* Evolution of space solar cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2001, Vol. 68, I. 1, pp. 1-13.
6. *Kozlov V.A., Kozlovskiy V.V.* Legirovanie poluprovodnikov radiatsionnymi defektami pri obluchanii protonami i α -chastitsami [Doping of semiconductors with radiation defects when irradiated with protons and α -particles], *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and Technology of semiconductors], 2001, Vol. 35, V. 7, pp. 769-795.
7. *Gubarev V., Semenov A., Surma A., Stolbunov V.* Tekhnologiya protonnogo oblucheniya i vozmozhnosti ee primeneniya dlya uluchsheniya kharakteristik silovykh diodov i tiristorov [Proton irradiation technology and the possibilities of its application to improve the characteristics of power diodes and thyristors], «Proton-Elektroteks». Available at: https://proton-electrotex.com/files/project_52/15_Protonnoe_obluchenie_rus.pdf (publication date 29 November 2011).
8. *Asadchikov V.E., D'yachkova I.G., Zolotov D.A., Krivososov Yu.S., Bublik V.T., SHikhov A.I.* O svyazi protonnogo oblucheniya i termicheskoy obrabotki monokristallicheskogo kremniya s ego strukturoy [On the connection of proton irradiation and heat treatment of monocrystalline silicon with its structure], *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki* [Izvestiya vuzov. Materials of electronic equipment], 2019, Vol. 22, No. 1, pp. 18-26.
9. *Anfimov I.M., Kobeleva S.P., Pylnev A.V., Schemerov I.V., Egorov D. S., Yurchuk S.Yu.* On the Problem of Determining the Bulk Lifetime by Photoconductivity Decay on the Unpassivated Samples of Monocrystalline Silicon, *Russian Microelectronics*, 2017, Vol. 46, No. 8, pp. 585-590.
10. *Koshelev O.G., Vasiljev N.G.* Separate determination of the photoelectric parameters of $n^+p(n)-p^+$ silicon structure base region by noncontact method based on measurements of quantum efficiency relationships at two wavelengths, *Modern Electronic Materials*, 2017, Vol. 3, No. 3, pp. 127-130.
11. *Bscheid C., Engst C.R., Eisele I., Kutter C.* Minority Carrier Lifetime Measurements for Contactless Oxidation Process Characterization and Furnace Profiling, *Materials*, 2019, Vol. 12, No. 1, pp. 1-13.
12. *Sam R., Zouma B., Zougmore F., Koalaga Z., Zoungrana M., Zerbo I.* 3D determination of the minority carrier lifetime and the p-n junction recombination velocity of a polycrystalline silicon solar cell, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2012, Vol. 29, No. 012018, pp. 1-8.
13. *Bogatov N.M., Grigor'yan L.R., Kovalenko A.I., Kovalenko M.S., Lunin L.S.* Impul'snye kharakteristiki kremnievykh fotoelektricheskikh preobrazovateley, obluchennykh nizkoenergeticheskimi protonami [Pulse characteristics of silicon photovoltaic converters irradiated with low-energy protons], *Pis'ma v ZhTF* [Letters to the Journal of Technical Physics], 2021, Vol. 47, V. 7, pp. 10-12.
14. *Agafonov Yu.A., Bogatov N.M., Grigor'yan L.R., Zinenko V.I., Kovalenko A.I., Kovalenko M.S., Kolokolov F.A.* Vliyanie radiatsionnykh defektov, sozdannykh nizkoenergeticheskimi protonami v sil'nolegirovannom sloe, na kharakteristiki kremnievykh n^+p-p^+ -struktur [The effect of radiation defects created by low-energy protons in a highly alloyed layer on the characteristics of silicon n^+p-p^+ structures], *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya* [Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies], 2018, No. 10, pp. 86-91.

15. *Bogatov N.M., Grigor'yan L.R. Kovalenko A.I., Kovalenko M.S., Kolokolov F.A., Lunin L.S.* Vliyaniye radiatsionnykh defektov, sozdannykh nizkoenergeticheskimi protonami pri temperature 83 K, na kharakteristiki kremnievykh fotoelektricheskikh struktur [The influence of radiation defects created by low-energy protons at a temperature of 83 K on the characteristics of silicon photovoltaic structures], *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and technology of semiconductors], 2020, Vol. 54, V. 2, pp. 144-149.
16. *Shockley W.* The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors, *Bell Syst. Tech. J.*, 1949, Vol. 28, No. 7, pp. 435-439.
17. *Pulfray D.L.* Understanding Modern Transistors and Diodes. Cambridge University Press, 2010, 335 p.
18. *Bogatov N.M.* Radiatsionnye defekty v kremnii, vyrashchennom metodom Chokhralskogo [Radiation defects in silicon grown by the Chokhralsky method], *Poverkhnost'* [Surface], 1999, No. 3, pp. 72-78.
19. *Bogatov N.M., Kovalenko M.S.* Calculation of Frenkel Pairs Separation, Formed in Silicon as a Result of Ionizing Particles Irradiation, *AASCIT Journal of Physics*, 2017, Vol. 3, I. 3, pp. 13-17.
20. *Bogatov N.M., Grigor'yan L.R., Klenevskiy A.V., Kovalenko M.S.* Modelirovaniye oblastey razuporyadocheniya v protsesse radiatsionnogo defektoobrazovaniya [Modeling of areas of disordering in the process of radiation defect formation], *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of the scientific centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 59-65.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.С. Магомадов.

Богатов Николай Маркович – Кубанский государственный университет; e-mail: bogatov@phys.kubsu.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: +79034513106; д.ф.-м.н.; профессор.

Володин Владимир Сергеевич – e-mail: volodinvs1995@mail.ru; тел.: +79898203672; аспирант.

Григорьян Леонтий Рустемович – e-mail: leonmezon@mail.ru; тел.: +79181681719; к.ф.-м.н.; доцент.

Коваленко Алексей Иванович – e-mail: physinf@phys.kubsu.ru. тел.: 88612199501*266; аспирант,

Коваленко Максим Сергеевич – e-mail: m.s.kovalenko@ya.ru; тел.: +79184694954; к.ф.-м.н.; доцент.

Bogatov Nikolay Markovich – Kuban State University; e-mail: bogatov@phys.kubsu.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79034513106; dr. of phys. and math.; professor.

Volodin Vladimir Sergeevich – e-mail: volodinvs1995@mail.ru; phone: +79898203672; graduate student.

Grigoryan Leontiy Rustemovich – e-mail: leonmezon@mail.ru; phone: +79181681719; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

Kovalenko Alexey Ivanovich – e-mail: physinf@phys.kubsu.ru; phone: +78612199501*266; graduate student.

Kovalenko Maxim Sergeevich – e-mail: m.s.kovalenko@ya.ru; phone: +79184694954; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.