

07.2;07.3

## Импульсные характеристики кремниевых фотоэлектрических преобразователей, облученных низкоэнергетическими протонами

© Н.М. Богатов<sup>1</sup>, Л.Р. Григорьян<sup>1</sup>, А.И. Коваленко<sup>1</sup>, М.С. Коваленко<sup>1</sup>, Л.С. Лунин<sup>2</sup><sup>1</sup> Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия

E-mail: bogatov@phys.kubsu.ru, bogatov.n@inbox.ru

Поступило в Редакцию 23 октября 2020 г.

В окончательной редакции 17 декабря 2020 г.

Принято к публикации 17 декабря 2020 г.

Исследовано влияние облучения низкоэнергетическими протонами на импульсные характеристики кремниевых фотоэлектрических структур. Для измерения использовались биполярные прямоугольные импульсы напряжения с постоянной амплитудой 10 мВ и частотой 200 кГц и 1 МГц. Показано, что облучение протонами с энергией 180 кэВ и дозой  $10^{15} \text{ см}^{-2}$  создает в области пространственного заряда  $n^+ - p$ -перехода область с высокой концентрацией радиационных дефектов. Такие элементы могут использоваться для создания быстродействующих фотодиодов с рабочей частотой модуляции 18 МГц.

**Ключевые слова:** фотодиод, кремний, время жизни, протон.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.07.50791.18596

Импульсные характеристики фотодиодов зависят от рекомбинационных параметров полупроводниковых структур. В кремнии время жизни неравновесных носителей заряда определяется рекомбинацией через примесные центры. Облучение кремниевых структур протонами дает возможность уменьшить время жизни носителей заряда в локальном объеме структуры, что позволяет улучшить совокупность статических и частотных характеристик приборов [1].

Измерения времени жизни неосновных носителей заряда с помощью регистрируемой микроволновым излучением фотопроводимости используются для контроля результатов технологических воздействий [2]. На значение времени жизни, измеренное по изменению фотопроводимости, влияет поверхностная рекомбинация [3,4]. Влияние структурных дефектов на объемную составляющую времени жизни неосновных носителей заряда и скорости рекомбинации в  $p-n$ -переходе в двустороннем солнечном элементе на основе поликристаллического кремния определялось исходя из экспериментальной кривой переходного напряжения при импульсном освещении [5].

Низкоэнергетические протоны создают радиационные дефекты с максимумом распределения в области пика Брэгга, расположение которого в объеме облучаемого образца определяется энергией падающих протонов. В работах [6,7] исследовано влияние протонов с энергией  $E_p = 40$  и 180 кэВ при температуре облучаемых образцов  $T_p = 83$  и 300 К на параметры вольт-амперных характеристик кремниевых фотоэлектрических преобразователей (ФЭП)  $n^+ - p - p^+$ -типа. Показано, что протоны с начальной энергией 40 кэВ преимущественно изменяют физические свойства  $n^+$ -слоя, а протоны с начальной энергией 180 кэВ — свойства области

пространственного заряда (ОПЗ) в  $p$ -слое. Количество радиационных дефектов в максимуме распределения в  $n^+$ -слое при  $E_p = 40$  кэВ,  $T_p = 83$  К много меньше, чем в  $p$ -слое при  $E_p = 180$  кэВ,  $T_p = 83$  К и в  $n^+$ -слое при  $E_p = 40$  кэВ,  $T_p = 300$  К. Импульсные характеристики облученных структур в этих работах не исследовались.

Цель настоящей работы — изучение влияния облучения низкоэнергетическими протонами на импульсные характеристики кремниевых структур с диффузионным  $n^+ - p$ -переходом. Чтобы исключить временную зависимость фототока и фотопроводимости в методиках [2–5], измерялось переходное напряжение в неосвещенных образцах.

Исследовались фотоэлектрические двусторонние  $n^+ - p - p^+$ -структуры из кремния, выращенного методом Чохральского, с удельным сопротивлением базы  $p$ -типа  $\rho = 10 \Omega \cdot \text{см}$ , концентрацией равновесных дырок  $p_0 \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , глубиной диффузионных  $n^+ - p$ - и  $p - p^+$ -переходов  $d_n \approx d_p \approx 0.45 \mu\text{м}$ , толщиной  $L \approx 200 \mu\text{м}$ . Поверхностная концентрация фосфора составляла  $N_F \approx 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , бора —  $N_B \approx 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Образцы площадью  $S \approx 1 \text{ см}^2$  были получены при лазерном разделении пластин с помощью твердотельного YAG-лазера в импульсном режиме работы.

Образцы облучались со стороны  $n^+$ -слоя потоком протонов с энергией  $E_p = 40, 180$  кэВ и дозой  $F_p = 10^{15} \text{ см}^{-2}$  при температуре образцов  $T_p = 300$  и 83 К на имплантере Extron/Varian: образец № 1 при  $E_p = 180$  кэВ,  $T_p = 83$  К; образец № 2 при  $E_p = 40$  кэВ,  $T_p = 83$  К; образец № 3 при  $E_p = 40$  кэВ,  $T_p = 300$  К. Контрольный образец № 4 не облучался.

Импульсные характеристики измерялись с помощью цифрового осциллографа DSOX2022A, работающего в режимах как генератора импульсов напряжения, так и

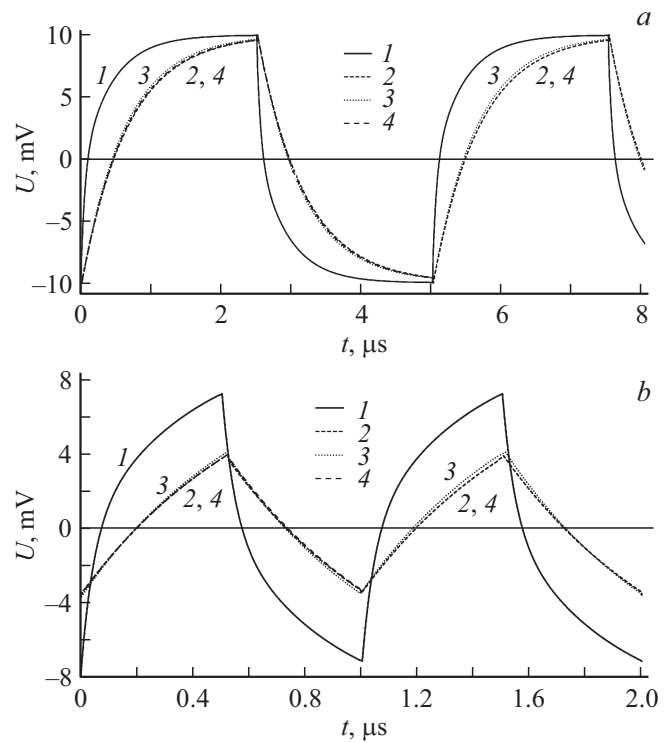
мультиметра. Измерения проводились в темноте при температуре 300 К. Исследуемый образец ФЭП через кабель ( $R = 0.1 \Omega$ ) подключался к генератору сигналов. Осциллограф подключался параллельно образцу через высокочастотный шуп ( $f_{\max} = 300 \text{ MHz}$ ). На исследуемый образец с генератора подавались биполярные прямоугольные импульсы напряжения с постоянной амплитудой  $U_0 = 10 \text{ mV}$  и с частотой  $f = 200 \text{ kHz}$  при длительности импульса  $2.5 \cdot 10^{-6} \text{ s}$  либо с частотой  $f = 1 \text{ MHz}$  при длительности импульса  $0.5 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ . Зависимость напряжения  $U$  от времени измерялась осциллографом. Шаг дискретизации измеряемого сигнала составлял  $5 \text{ ns}$  для  $f = 200 \text{ kHz}$  и  $2.5 \text{ ns}$  для  $f = 1 \text{ MHz}$ . Импульсные характеристики, представленные на рисунке, с достаточной точностью аппроксимируются одноэкспоненциальной зависимостью напряжения от времени для образцов № 2–4 и двухэкспоненциальной зависимостью для образца № 1. Амплитуда прямоугольных импульсов напряжения  $U_0 < kT/q$  выбрана так, чтобы фронт напряжения изменялся симметрично при переключении полярности импульсов и выполнялось условие низкого уровня инжекции неосновных носителей заряда. В масштабе рисунка (части *a* и *b*) зависимости  $U(t)$  для образцов № 2–4 близки. На рисунке, *a* зависимости  $U(t)$  для образцов № 2–4 не успевают выйти на насыщение за время длительности импульса, а на рисунке, *b* все зависимости  $U(t)$  не успевают выйти на насыщение за время длительности импульсов.

В результате для образцов № 2–4 найдены близкие значения постоянной времени  $\tau$  фронта сигнала, усредненные по периодам импульса напряжения: для образца № 2  $\tau = 6.6 \cdot 10^{-7} \text{ s}$ , для образца № 3  $\tau = 6.3 \cdot 10^{-7} \text{ s}$ , для образца № 4  $\tau = 6.4 \cdot 10^{-7} \text{ s}$ . Для образца № 1 найдены два значения:  $\tau_1 = 4.2 \cdot 10^{-7} \text{ s}$ ,  $\tau_2 = 5.5 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ .

Фронт напряжения при переключении полярности обусловлен процессами изменения неравновесного заряда в  $n^+$ -,  $p$ -областях и ОПЗ  $n^+ - p$ -перехода. Поэтому изменение структуры и рекомбинационных свойств ОПЗ влияет на форму фронта сигнала  $U(t)$ . Найденные значения постоянной времени фронта сигнала много меньше, чем время жизни электронов  $\tau_n$  в базе, и много больше, чем время жизни дырок  $\tau_p$  в  $n^+$ -слое.

Протоны с  $E_p = 40 \text{ keV}$  создают первичные радиационные дефекты в  $n^+$ -слое на расстоянии  $0.41 \mu\text{m}$  от поверхности, их количество в образцах № 2, 3 различается в несколько раз [6], однако значения  $\tau$  для этих образцов и образца № 4 близки и, следовательно, не отражают изменения, произошедшие в  $n^+$ -слое. Длительность прямоугольного импульса много меньше  $\tau_n$ , поэтому значения  $\tau$  не характеризуют рекомбинационные процессы в базе. Таким образом, фронт сигнала  $U(t)$  определяется свойствами ОПЗ, а значения  $\tau$  соответствуют эффективному времени жизни носителей заряда в этой области.

Протоны с  $E_p = 180 \text{ keV}$  создают первичные радиационные дефекты на глубине  $1.51 \mu\text{m}$  во всей ОПЗ  $n^+ - p$ -перехода, пик Брэгга расположен на глубине



Импульсные характеристики при частоте импульсов напряжения 200 kHz (*a*) и 1 MHz (*b*). Номера кривых соответствуют номерам образцов.

$1.48 \mu\text{m}$  [7]. Два значения  $\tau_1$  и  $\tau_2$  свидетельствуют о том, что структура ОПЗ образца № 1 изменилась, в ней существуют две области с различными значениями среднего времени жизни. Значение  $\tau_2$  относится к области с высокой концентрацией радиационных дефектов в окрестности пика Брэгга.

Результаты исследования показывают, что облучение протонами с энергией 180 keV и дозой  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$  модифицирует свойства ОПЗ  $n^+ - p$ -перехода кремниевых ФЭП, снижая значение постоянной времени фронта сигнала напряжения до  $5.5 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ . Такие ФЭП могут использоваться для создания быстродействующих структур с рабочей частотой модуляции 18 MHz.

## Благодарности

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

## Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания на 2021 г. Федерального исследовательского центра Южного научного центра РАН (номер госрегистрации 01201354240).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] В.А. Козлов, В.В. Козловский, ФТП, **35** (7), 769 (2001). <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/38565>
- [2] C. Bscheid, C.R. Engst, I. Eisele, C. Kutter, Materials, **12** (1), 190 (2019). DOI: 10.3390/ma12010190
- [3] И.М. Анфимов, С.П. Кобелева, А.В. Пыльнев, И.В. Щермеров, Д.С. Егоров, С.Ю. Юрчук, Изв. вузов. Материалы электронной техники, **19** (3), 210 (2016). DOI: 10.17073/1609-3577-2016-3-210-216 [Пер. версия: 10.1134/S1063739717080030].
- [4] O.G. Koshelev, N.G. Vasiljev, Mod. Electron. Mater., **3** (3), 127 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.moem.2017.11.002>
- [5] R. Sam, B. Zouma, F. Zougmore, Z. Koalaga, M. Zoungrana, I. Zerbo, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., **29**, 012018 (2012). DOI: 10.1088/1757-899X/29/1/012018
- [6] Ю.А. Агафонов, Н.М. Богатов, Л.Р. Григорьян, В.И. Зиненко, А.И. Коваленко, М.С. Коваленко, Ф.А. Колоколов, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 10, 86 (2018). DOI: 10.1134/S0207352818110033
- [7] Н.М. Богатов, Л.Р. Григорьян, А.И. Коваленко, М.С. Коваленко, Ф.А. Колоколов, Л.С. Лунин, ФТП, **54** (2), 144 (2020). DOI: 10.21883/FTP.2020.02.48909.9255