

# CONTROL PARAMETERS OF THE SILICON CORE AREA P<sup>+</sup> NN<sup>+</sup> -DIODES BY RADIATION EXPOSURE

S. Zaynobidinov

A. Rahmatov

Sh. Kuliev

УДК 621.315.592

## УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ БАЗОВОЙ ОБЛАСТИ КРЕМНИЕВЫХ P+NN+-ДИОДОВ РАДИАЦИОННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

С. Зайнобидинов, А. З. Рахматов, Ш. М. Кулиев

*Кремнийли р<sup>+</sup>nn<sup>+</sup>-структуранинг база соҳаси параметларига нейтрон тоблашининг таъсири натижалари келтирилган.  $3 \cdot 10^{15}$  н/см<sup>2</sup> дозали нейтрон тоблаш таъсирида р<sup>+</sup>n-ўтишининг ҳажмий заряди берилган қалинлигига нисбатан икки мартадан кўпроқ ошиши топилган, қайсики р<sup>+</sup>n-ўтиш чегарасида i-қатлам ҳосил бўлиши билан боғлиқ. Шу билан бирга берилган электр майдонининг кучланганлиги икки баробар катта кучланишда эришилади, натижада структуранинг сизими ва кремнийли диоднинг очилиш вақти камаяди.*

**Калит сўзлар:** кремнийли р<sup>+</sup>nn<sup>+</sup>-структура, нейтронли тоблаш, сизим, очилиш вақти, ҳажмий заряд, тикланиш вақти.

*Приведены результаты исследования влияния нейтронного облучения на параметры базовой области кремниевой р<sup>+</sup>nn<sup>+</sup>-структуры. Под воздействием нейтронного облучения дозой  $3 \cdot 10^{15}$  н/см<sup>2</sup> обнаружено увеличение исходной толщины слоя объемного заряда р<sup>+</sup>n-перехода более чем в два раза, что объясняется образованием i-слоя у границы с р<sup>+</sup>n-переходом. При этом заданная напряженность электрического поля после облучения достигается в два раза больших напряжениях, в результате чего уменьшается емкость структуры и время включения кремниевого диода.*

**Ключевые слова:** кремниевая р<sup>+</sup>nn<sup>+</sup>-структура, нейтронное облучение, емкость, время включения, объемный заряд, время восстановления.

**Введение.** Элементы силовой микроэлектроники находят широкое практическое применение в ряде отраслей, как атомная промышленность, космическая, оборонная, авиационная и многие другие. Они составляют основу энергосберегающих устройств, обеспечивая минимальные потери полезной мощности, быстродействие, надежность и низкую стоимость.

Однако, силовые кремниевые диоды, изготовленные по промышленной технологии, не в полной мере удовлетворяют возрастающим требованиям, так как изначально эти силовые диоды обладают сравнительно низким быстродействием, а их функциональные параметры существенно зависят от технологических факторов, что приводит к большому разбросу значений эксплуатационных параметров готовых диодов, ограничивая надежность и область применения силовых кремниевых диодов [1. С. 29].

Повышение быстродействия, снижение динамических потерь мощности является одной из важных задач силовой микроэлектроники, в частности, обеспечение оптимального значения прямого падения напряжения, сравнимого с контактной разностью потенциалов р-n-перехода и малых токов утечки. По возможности необходимо добиться минимальных значений времени восстановления обратного тока и времени жизни неосновных носителей. Для этого диодные струк-

туры подвергаются воздействию гамма квантами или быстрыми электронами [2. С. 736, 3. С. 249, 4. С. 537]. При облучении электронами создаются равномерно распределенные радиационные центры по всему объему базовой области диода. Кроме того компенсация легирующей примеси радиационными дефектами приводит к увеличению прямого падения напряжения. То есть после проведения процесса облучения диодов необходимо проводить их термический отжиг для снижения падения напряжения и токов утечки. Облучение электронами или гамма квантами [5. С. 181, 6. С. 26, 7. С. 140, 8. С. 259] позволяет формировать соответствующие радиационные дефекты, с идентичными характеристиками, способствуя при определенных дозах уменьшению падения напряжения на р-n-переходе.

Однако и в данном случае, для оптимизации ключевых параметров диодов требуется проводить процесс отжига дефектов [3. С. 249, 4. С. 537, 6. С. 26, 7. С. 140, 8. С. 259]. По сравнению с облучением гамма-квантами облучение электронами позволяет без термического отжига сохранить номинальные значения обратного тока [6. С. 26]. Вместе с тем авторами работ [9. С. 5007, 10. С.111] показано, что отжиг кремниевых р<sup>+</sup>n-диодов, облученных флюенсами электронов от  $10^{15}$  до  $4 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> энергией 3.5 МэВ, приводит к уменьшению общей величины потерь, включая

## ФИЗИКА

потери на сквозную проводимость, и смещению максимума потерь в сторону низких частот. Из-за высокой концентрации радиационных дефектов при малых флюенсах облучения возможно существенное снижение времени восстановления обратного тока облученных диодов, а также снижение падения напряжения при наличии участков свободных от радиационных дефектов. При этом в ходе радиационного воздействия в базовой области образуются дефекты в виде акцепторных центров и в такой структуре область объемного заряда может разделиться на области сильного и слабого полей [11. С. 243]. Вместе с тем, при воздействии радиационным излучением характеризующие свойства *p-n*-перехода могут измениться от резкого характера до плавного [12. С. 348], хотя технологически исходные профили могут быть различными.

В работе [13. С. 53] исследуемые ограничители напряжения изготовлены методом диффузии бора с последующей одновременной двухсторонней диффузией бора и фосфора каскадным методом [14] из твердотельных источников к *n*-кремнию КЭФ 2.5 для получения напряжения пробоя 200 вольт, готовые диодные структуры с *p<sup>+</sup>n<sup>+</sup>*-переходом в виде шестигранника имеют площади 54.8 мм<sup>2</sup>. На основе исследования вольтамперных характеристик диодов облученных быстрыми нейтронами обнаружены эффекты независимости высоты барьера и оценена эффективная концентрация примесных центров.

Авторами работы [15. С. 332] экспериментально показано, что для стабилизации параметров диодов из одной партии необходимо идентифицировать пробивные напряжения путем увеличения дозы интегрального потока нейтронного облучения, которое обратно пропорционально напряжению пробоя.

Следует отметить, что смена линейной зависимости времени жизни неосновных носителей от дозы нейтронного облучения на экспоненциальную зависимость связана с изменением закономерности образования рекомбинационных центров. Такая модель не предусматривает возможность перерождения существующих в исходном материале рекомбинационных центров в процессе интенсивного облучения нейтронами, а также возможность их взаимодействия с вновь рожденными рекомбинационными центрами, которые, по-видимому, будут иметь место при больших дозах нейтронного облучения. В диодах с высоким удельным сопротивлением при нейтронном облучении быстродействие увеличивается в семь раз, а в образцах с низким удельным сопротивлением - в четыре раза. При

этом емкости уменьшаются на 50 и 33% соответственно [16. С. 180]. Также в работе [17. С. 935] показано, что заданная напряженность электрического поля после облучения нейтронами достигается при больших напряжениях, а эффективный градиент нескомпенсированного заряда в *p-n*-переходе зависит от флюенса нейтронов. В случае линейного распределения нескомпенсированного заряда вблизи *p-n*-перехода образуется компенсированная область с собственной проводимостью.

Однако возможность управления параметрами базовой области за счет управления градиентом концентрационного профиля распределения примесей остается малоизученной.

**Целью настоящей работы** является исследование возможности управления нейтронным облучением параметрами базовой области кремниевых диодных *p<sup>+</sup>nn<sup>+</sup>*-структур производимых в АО "FOTON".

**Исследуемые образцы и методика эксперимента.** Исследуемые кремниевые диоды изготовлены на пластинах монокристаллического кремния однородно легированных фосфором, с удельным сопротивлением - 2 Ом·см. Концентрация фосфора в базе составляет  $8.5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Толщина пластин - 200 мкм, плоскость - (111). Область *p<sup>+</sup>*-типа создавалась диффузией бора при температуре 1100 °С в течение 48 час. В качестве диффузанта использовали -КБК-45 (45%-ным содержанием борной кислоты), создающий с исходным кристаллом *p-n*-переход, на поверхность кристалла наносится дважды. Глубина залегания *p<sup>+</sup>n*-перехода 40 мкм. Область *n<sup>+</sup>*-типа создавалась диффузией фосфора на глубину 50 мкм из диффузанта КФК-54 (54%-ным содержанием фосфорной кислоты) нанесенного одним слоем. Активная площадь *p<sup>+</sup>n*-перехода в готовой структуре равна 4.41 мм<sup>2</sup>.

Облучение образцов нейтронами осуществлялось на исследовательском реакторе ИИН-3М. Оценка флюенса нейтронов с энергией  $E > 3$  МэВ осуществлялась по серным индикаторам S<sup>32</sup> с последующим приведением (по известному спектру реактора ИИН-3М) к флюенсу нейтронов с энергией  $E \geq 100$ кэВ. Средняя энергия нейтронов при этом составляла ~ 1,5 МэВ, а погрешность дозиметрии ± 20%. До и после радиационного воздействия функциональные параметры оценивались на основе анализа зависимости барьерной емкости от напряжения.

Вольтамперные характеристики исследуемых диодов измерялись на стандартной установке Л2-7 (рис.1), согласно ГОСТа 18986.4 с погрешностью не более 5 %.

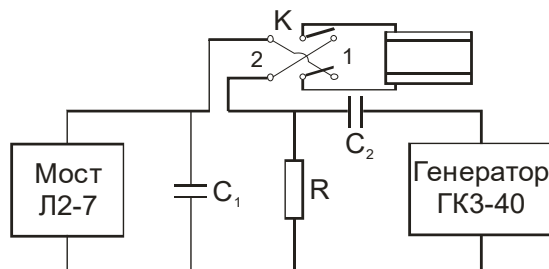


Рис. 1. Блок схема измерителя емкости

Данная установка обеспечивает подачу постоянного напряжения смещения и низкое напряжение (0.003 вольт) переменного сигнала от звукового генератора. При этом также обеспечиваются условия, то есть  $(C^1, C^2 / C_{услн}) > 200$ . Зависимости емкости от напряжения снимались путем подачи малого переменного сигнала и постоянного напряжения с автоматической настройкой частоты переменного сигнала с емкостью образца. При малых емкостях (пФ) включался высокочастотный, а при больших емкостях низкочастотный генератор.

Радиационному воздействию с последующим измерением вышеуказанных параметров подвергались выборки, состоящие из 10 диодов. Выборки были разделены на 2 части (по 5 диодов в каждой части), каждая из которых облучалась в два этапа (двумя потоками нейтронов) с измерением параметров диодов после каждого этапа облучения.

Для анализа зависимостей параметров от флюенса нейтронов ( $\Phi$ ) использовались средние значения параметров после соответствующего радиационного воздействия, замеренные на образцах, входящих в каждую часть (5 диодов) выборки. Подобный подход к планированию эксперимента позволяет устранить влияние неконтролируемых

факторов на его результаты и повысить его достоверность.

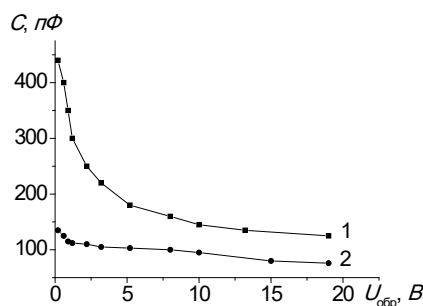
#### Результаты эксперимента и их обсуждение.

Исследование влияния нейтронного облучения на емкостные характеристики кремниевого  $p^+np^+$ -диода показывает (рис. 2), что на начальном участке напряжений исходная емкость уменьшается по квадратичному закону и далее зависимость ослабляется за счет смены профиля распределения примесей. То есть под воздействием нейтронного облучения зависимости емкости от напряжения существенно изменяются. Наибольшие изменения претерпевают начальные участки, где исходные значения емкости уменьшаются в три раза, и далее значения емкости стремятся к насыщению.

Прежде чем перейти к обсуждению наблюдаемых зависимостей напомним, что толщина слоя объемного заряда обратно пропорциональна ёмкости [18. С. 880]

$$W = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{C} \quad (1)$$

и концентрации носителей. В свою очередь емкость прямо пропорциональна концентрации носителей.



1-до облучения; 2-после облучения

Рис. 2. Зависимости емкости кремниевого  $p^+np^+$ -диода от запирающего напряжения

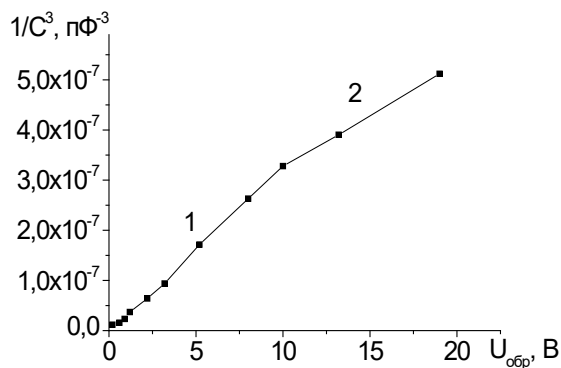
Таким образом, чем меньше концентрация носителей-  $N_{p,n}$ , тем больше толщина слоя обеднения -  $W$  и меньше емкость-  $C$ . Эта взаимосвязь

остается в силе в области напряжений  $V < 4kT$ . При любом распределении заряда по изменению емкости при малых приращениях напряжения сме-

## ФИЗИКА

щения можно определить распределение концентрации носителей по углу наклона графика зависимости  $C^{-2}$  от  $U$  при условии, что известны значения концентрации носителей  $n$  или  $p$ -области [19. С. 44].

Зависимости емкости от запирающего напряжения описываются степенной закономерностью, соответствующей плавному переходу  $1/C^3 \sim U_{обр}$ , рис. 3, и претерпевают излом, связанный со сменой градиента распределения примесей фосфора в базовой области. Первый участок охватывает до 10 В, чему соответствует толщина обедненного слоя порядка 6 мкм, определенная из вольтемкостной зависимости с учетом падения напряжения в соответствующих областях [20. С. 27] и далее следует второй участок.



1-первый участок; 2-второй участок

Рис. 3. Зависимость емкости от запирающего напряжения

Так, прямое падение напряжения при заданном токе на диоде представляет собой:

$$U_{\text{прям}} = U_{p-n} + U_{\text{ПРИЛОЖ}} \quad (4)$$

В отличие от транзисторной структуры с тонкой базовой областью, наблюдаемое на эксперименте увеличение падения напряжения на силовом диоде  $U_{\text{прям}}$  для заданного тока можно связать с увеличением падения напряжения в его базовой области:

$$U_{\delta} = j_{\text{прям}} W_{\delta} \rho, \quad (5)$$

где:  $W_{\delta}$  - толщина квазинейтральной области базы;  $\rho$  - удельное сопротивление базы.

При нулевом смещении имеем толщину  $p^+n$ -перехода, а по мере увеличения запираемого напряжения область объемного заряда будет занимать базовую область и оставшаяся часть будет равна толщине квазинейтральной области базы. В таком разрезе проведены оценки геометрии кремниевого  $p^+nn^+$ -диола.

$$W_{p-n} = \varepsilon \varepsilon_0 S / C (U_{\kappa} \mp U_{\text{ПРИЛОЖ}}) \quad (2)$$

где  $U_{\kappa}$  - контактная разность потенциалов  $p^+n$ -перехода,  $U_{\text{ПРИЛОЖ}}$  - напряжение, приложенное от источника питания.

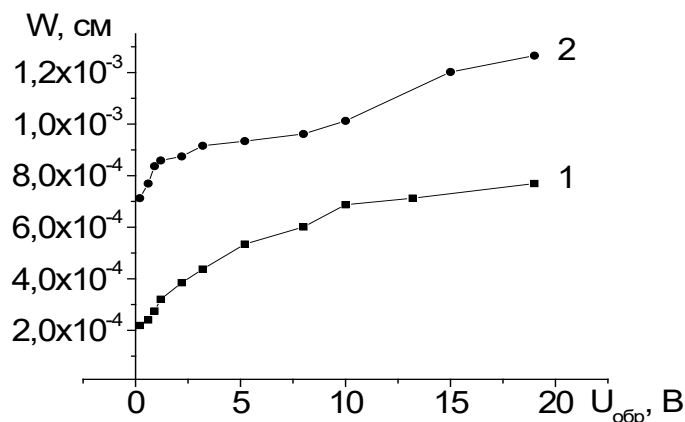
В свою очередь падение напряжения на  $p$ - $n$ -переходе. То есть контактная разность потенциалов определяется выражением

$$U_{p-n} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{J \cdot N_{\delta}}{q S_{p-n} n_i^2} \cdot \sqrt{\frac{\tau_{\delta}}{D_{\delta}}} \right) \quad (3)$$

где  $N_{\delta}$  - концентрация легирующих примесей в базе;  $\tau_{\delta}$ ,  $D_{\delta}$  - время жизни и коэффициент диффузии неосновных носителей.

Так, по мере увеличения запирающего напряжения свыше 10 В толщина слоя объемного заряда стремится к насыщению, то есть его рост замедляется, рис. 4, кривая 1. После воздействия нейтронным облучением дозой  $3 \cdot 10^{15}$  н/см<sup>2</sup> исходная толщина слоя объемного заряда  $p^+n$ -перехода увеличивается с 2 мкм до 7 мкм и далее наблюдается характерное изменение, рис. 3, кривая 2. Такое поведение области объемного заряда от запирающего напряжения можно объяснить соответствующим изменением градиента распределения примесей у границы  $p^+n$ -перехода и увеличением удельного сопротивления базовой области после облучения [21. С. 78].

Из характера зависимости толщины области обеднения после воздействия нейтронного облучения следует, что базовая область разбивается на два участка. Вначале имеется компенсированный участок, далее концентрация носителей увеличивается близко к линейному, а затем следует незначительная компенсация носителей сменяющийся в малой степени нарастающей концентрацией носителей.



1-до облучения; 2-после облучения

Рис. 4. Зависимости толщины слоя объемного заряда от запирающего напряжения кремниевого  $p^+np^+$ -диода

Согласно данным значениям, зависимости толщины слоя объемного заряда от запирающего напряжения до облучения, принимая толщину  $p^+$ -области равной 40 мкм, а  $n^+$ -области 50 мкм и с вычетом исходной толщины области объемного заряда 2 мкм получим толщину квазинейтральной области порядка 108 мкм. После радиационного облучения происходит добавка к области объемного заряда дополнительной области толщиной 5 мкм с собственной концентрацией носителей, за которым следует высокоомная область толщиной 1.5 мкм и участок с нарастающей концентрацией носителей порядка 9 мкм. В результате толщина квазинейтральной  $n$ -области после облучения уменьшается до 92.5 мкм. Построенные на осно-

ве этих данных качественные зонные диаграммы приведены на рис. 5.

Как видно из зонной диаграммы  $p^+np^+$ -структуры до облучения нейтронами исходная толщина области объемного заряда от запирающего напряжения увеличивается по одному закону за счет охвата квазинейтральной области слоем объемного заряда, рис. 5а. В дальнейшем по мере достижения критического поля наступает режим пробоя, и перестают расширяться слой объемного заряда. При этом за счет диффузионного распределения носителей толщина обедненного слоя увеличится до 6.8 мкм, а в дальнейшем будет увеличиваться до достижения критической величины.

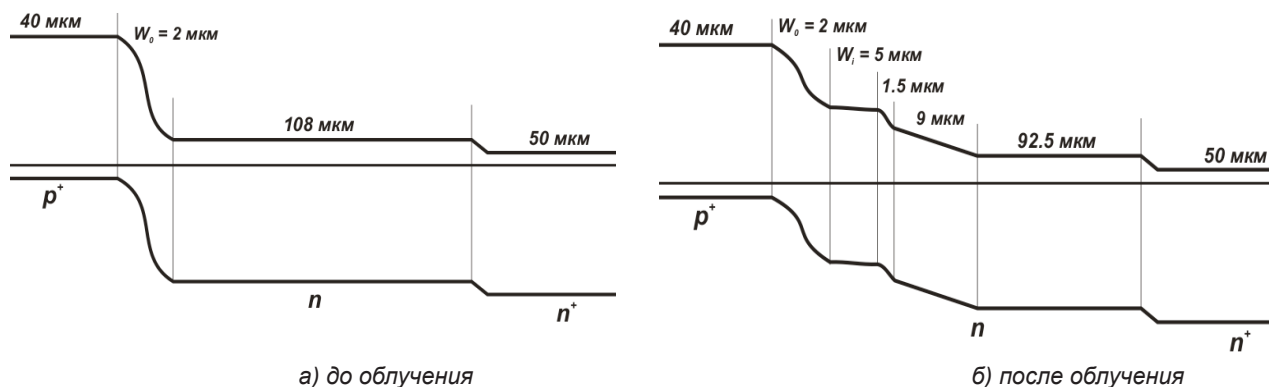


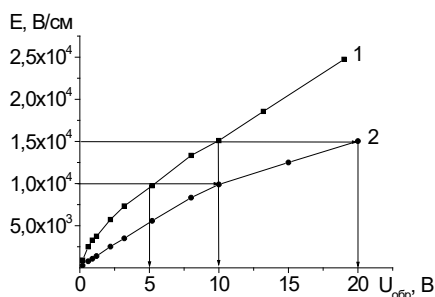
Рис. 5. Качественные зонные диаграммы кремневой  $p^+np^+$ -структуры

После облучения нейтронами, созданная у границы  $p^+n$ -перехода  $i$ -область оказывается охваченной объемным зарядом при низких напряжениях и в дальнейшем замедляется рост толщины слоя объемного заряда с последующим

расширением объемного заряда в направлении более равномерной области, рис. 5б.

После облучения нейтронами вместе с увеличением толщины области объемного заряда напряженность электрического поля тоже уменьшается, рис. 6.





1-до облучения; 2-после облучения

Рис. 6. Зависимости напряженности электрического поля р-п-перехода от запирающего напряжения кремниевой р+пп+-структуры

Заданная напряженность электрического поля ( $1 \cdot 10^4$  В/см) после облучения достигается при в два раза больших напряжениях (10 В вместо 5 В), аналогично для увеличенной напряженности электрического поля  $1.5 \cdot 10^4$  В/см имеем 20 В и 10 В, соответственно и существенное уменьшение емкости, приводящее к снижению времени включения кремниевое р+пн+-диода.

**Заключение.** Таким образом, в кремниевых р+пн+-диодных структурах со сравнительно тол-

стой базой (100 мкм) путем воздействия нейтронным облучением можно получить высокоомные области у приграничной области с р+-п-переходом. В частности, базовая область (110 мкм) кремниевое выпрямительно-ограничительного р+пн+-диода после нейтронного воздействия разбивается на две части, с градиентным (17.5 мкм) и равномерным распределением примесей (92.5 мкм). При этом у границы р+n-перехода создается i-область, приводящая к уменьшению емкости диодной структуры.

## Литература

1. Ладыгин Е.В., Коновалов М.П., Орлова М.Н., Ручкин М.В., Лагов П.Б., Сурма А.М. Повышение быстродействия и радиационной стойкости силовых кремниевых диодов с применением радиационного технологического процесса // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – Киев, 2006. – Вып.1-2. – С.29 – 37.
2. Козлов В.А., Козловский В.В. Легирование полупроводников радиационными дефектами при облучении протонами и  $\alpha$ -частицами // Физика и техника полупроводников, 2001. – Т. 35, № 7. – С. 769 – 795.
3. Hazdra P., Vobecky J., Dorschner H., Brand K. Axial lifetime control in silicon power diodes by irradiation with protons, alphas, low- and high-energy electrons. Microelectronics Journal, 2004 – Vol. 35. – № 3. – P. 249 – 257.
4. Vobecky J., Hazdra P., Zahlava V. Impact of the electron, proton and helium irradiation on the forward I-V characteristics of high-power p-i-n diode // Microelectronics Reliability, 2003. – Vol. 43. – № 4. – P. 537 – 544. DOI: [10.1016/S0026-2714\(03\)00023-4](https://doi.org/10.1016/S0026-2714(03)00023-4)
5. Kim J.H., Lee D.U., Kim E.K., Bae Y.H. () Electrical characterization of proton irradiated p+-n-p+ Si diode // Physica B., 2006 – Vol. 376 – 377. – P. 181 – 184.
6. Рахматов А.З., Таиметов М.Ю., Сандлер Л.С. Влияние проникающей радиации на параметры кремниевое планарного высокочастотного высоковольтного выпрямительного диода // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (98) – Киев, 2011. – №4. – С. 26-33.
7. Рахматов А.З., Каримов А.В., Сандлер Л.С., Ёдгорова Д.М., Скорняков С.П. Влияние гамма- и электронного облучения на ключевые параметры мощных высокочастотных диффузионных диодов // Компоненты и технологии, 2013. – №10. – С. 140 – 142.
8. Fizzoti F., Colombo E., Giudice A.Lo, Manfredotti C., Medunic Z., Jaksic M., Vittone E. Measurement of charge collection profiles in irradiated silicon diodes by lateral IBIC technique // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B. Beam Interactions with Materials and Atoms. 2007. – Vol. 260. – № 1. – P. 259 – 263. DOI: [10.1016/j.nimb.2007.02.031](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.02.031)
9. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V., Petrov A.V., Lastovskii S.B., Fink D., Wieck A. Electrical properties of silicon diodes with p+n junctions irradiated with  $^{197}\text{Au}^{26}$  swift heavy ions // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B. Beam Interactions with Materials and Atoms, 2008. – Vol. 266. – № 23. – P. 5007 – 5012. DOI: [10.1016/j.nimb.2008.09.001](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2008.09.001)
10. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Tarasik M.I., Shpakovski S.V., Filipenia V.A., Skuratov V.A., Wieck A., Koltunowicz T.N. Effects of fluences of irradiation with 107 MeV krypton ions on the recovery charge of silicon p+n-diodes // Acta Physica Polonica A., 2011. – Vol. 120. – № 1. – P. 111 – 114.
11. Козловский В.В., Емцев В.В., Емцев К.В., Строкан Н.Б., Иванов А.М., Ломасов В.Н., Оганесян Г.А., Лебедев

А.А. Влияние электронного облучения на скорость удаления носителей в кремнии и карбиде кремния модификации 4Н. // Физика и техника полупроводников, 2008. – Т. 42, Вып. 2. – С. 243 – 248.

12. Саакян В.А. Действие различных видов облучения на параметры кремниевых полупроводниковых приборов // Известия НАН Армении. Физика, 2008. – Т. 43, №5. – С. 348 – 354.

13. Рахматов А.З. Влияние нейтронного излучения на емкостные характеристики кремниевого ограничительного диода // Петербургский журнал электроники, 2012. – № 4. – С. 53 – 55.

14. Муратов А.Ф., Рахматов А.З., Меркулов А.А., Исмоилов И.Р. Способ изготовления кремниевых ограничителей напряжения. Патент РУз №5328. Бюллетень №3 от 30.09.94.

15. Rakhmatov A.Z., Petrov D.A., Karimov A.V., Yodgorova D.M., Abdulkhaev O.A. Influence of Neutron Radiation on Breakdown Voltage of Silicon Voltage Limiter // Radioelectronics and Communications Systems, 2012. – Vol. 55. – Issue 7. – P. 332 – 334. DOI: 10.3103/S0735272712070060

16. Рахматов А.З., Каримов А.В., Ёдгорова Д.М., Абдулхаев О.А. Исследование влияния нейтронного облучения на характеристические параметры кремниевых ограничителей напряжения // Компоненты и технологии, 2012. – № 5. – С. 180 – 182.

17. Rakhmatov A.Z. Effect of Neutron Irradiation on the Structure of Silicon p-n Junctions of Voltage Limiters // Semiconductors, 2014. – Vol. 48. – №7. – P. 935 – 941. DOI: 10.1134/S1063782614070185

18. Sze S.M., Kwok K.Ng. Physics of Semiconductor Devices. 3rd ed. – New York: Wiley, 2006. – 880 p. DOI:10.1002/0470068329

19. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент. Пер. с англ. под ред. М.М.Колтуна. – Москва: Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.

20. Каримов А.В., Ёдгорова Д.М. Определение характеристик двухбарьерных фотодиодных структур с металлополупроводниковыми переходами // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2005. – № 5. – С. 27 – 30.

21. Karimov A.V., Rakhmatov A.Z., Yodgorova D.M., Kuliev Sh.M., Bebitov R.R. (2018) The effect of radiation on fundamental parameters of a silicon-based semiconductor structure // World Journal of Engineering Research and Technology. – Vol. 4, Issue 1. – P. 78 – 81.

## CONTROL PARAMETERS OF THE SILICON CORE AREA P+ NN+ -DIODES BY RADIATION EXPOSURE

S. Z. Zaynobidinov<sup>a</sup>, A. Z. Rahmatov<sup>b</sup>, Sh. M. Kuliev<sup>c</sup>

*Ilmiy xabarnoma. Fizika-matematika tadqiqotlari – Scientific Bulletin. Physical and Mathematical Research. 2019. 1(42). 4–13.*

<sup>a</sup>Andijan State University, Andijan, 170100, str. University, 129 (Uzbekistan). E-mail: agsu\_info@edu.uz

<sup>b</sup>Joint Stock Company “FOTON”, Tashkent, 100047, str. Amir Temur, 13 (Uzbekistan). E-mail: info@oafoton.uz

<sup>c</sup>Physical-Technical Institute NGO “PHYSICS-SUN”, ASUZ, Tashkent, 100084, str. Chingiz Aytmatov, 2B (Uzbekistan). E-mail: ftikans@uzsci.net

**Key words:** silicon p<sup>+</sup>nn<sup>+</sup>-structure, neutron irradiation, capacity, on-time, space charge, recovery time.

The elements of power microelectronics are widely applied in a number of industries, such as atomic industry, aerospace, defence, aviation and many others. They form the basis of radio-electronic devices designed to ensure minimal loss of useful power and eliminate their failure. However, the power silicon diodes manufactured by the standard technology do not fully satisfy the increasing requirements for speed, reliability and maintained capacities due to the technological nonidentity of the parameters of the base area.

In this regard, the purpose of this work is to study the possibility of controlling neutron irradiation using the parameters of the base area of silicon diode p<sup>+</sup>nn<sup>+</sup> structures made in Joint-Stock Company «FOTON», which are made of phosphorus doped single-crystal silicon plates with a resistance of 2 Ohm·cm, where the p<sup>+</sup>-type region was created by boron diffusion at 1100 °C for 48 hours. Irradiation of samples with neutrons was carried out at the research reactor IIN-3M. The average neutron energy was ~ 1.5 MeV, and the dosimetry error was ± 20%. Before and after radiation exposure, functional parameters were estimated based on the analysis of the dependence of the barrier capacitance on voltage.

It was experimentally established that the base region of the p<sup>+</sup>nn<sup>+</sup> diode after neutron irradiation is divided into two sections. First, a compensated area is created, then the carrier concentration increases close to linear, and then a slight compensation of carriers follows, changing to a small degree by increasing carrier concentrations. As a result, taking into account the thickness of the p<sup>+</sup> region equal to 40 μm, and the n<sup>+</sup> region of 50 μm and minus the initial thickness of the space charge region of 2 μm, we obtain the thickness of the quasineutral region of the order of 108 μm. After radiation exposure, an additional area 5 μm thick with an intrinsic carrier density is added to the space charge region, followed by a high-resistance 1.5 μm thick region and an area with an increasing carrier density of about 9 μm. As a result, the thickness of the quasineutral n-region after irradiation decreases to 92.5 μm.



Thus, in silicon  $p^{+}nn^{+}$  -diode structures with a relatively thick base (100  $\mu\text{m}$ ), neutron irradiation can be used to obtain high-resistance regions near the border region with the  $p^{+}n$  junction. In particular, the base region (110  $\mu\text{m}$ ) of a silicon rectifier – restrictive  $p^{+}nn^{+}$  diode after neutron exposure is divided into two parts, with a gradient (17.5  $\mu\text{m}$ ) and uniform distribution of impurities (92.5  $\mu\text{m}$ ). At the same time, at the border of the  $p^{+}n$  junction, an  $i$ -region is created, leading to a decrease in the capacitance of the diode structure.

### References

1. Ladygin, E.V., Konovalov, M.P., Orlova, M.N., Ruchkin, M.V., Lagov, P.B., Surma, A.M. (2006) Povyshenie bystrodeystviya i radiacionnoj stojkosti silovyyh kremnievyyh diodov s primeneniem radiacionnogo tekhnologicheskogo processa [Improving the performance and radiation resistance of silicon power diodes using the radiation process]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Series: Fizika radiacionnogo vozdeystviya na radioelektronnyuyu apparaturu*. Vol.1-2. pp. 29-37.
2. Kozlov, V.A., Kozlovskij, V.V. (2001) Legirovanie poluprovodnikov radiacionnymi defektami pri obluchenii protonami i  $\alpha$ -chasticami [Doping of semiconductors with radiation defects when irradiated with protons and  $\alpha$ -particles] *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. Vol. 35 (7). pp. 769-795.
3. Hazdra, P., Vobecky, J., Dorschner, H., Brand, K. (2004) Axial lifetime control in silicon power diodes by irradiation with protons, alphas, low- and high-energy electrons. *Microelectronics Journal*. 35(3). Vol. 35, Issue 3. pp. 249-257.
4. Vobecky, J., Hazdra, P., Zahlava, V. (2003) Impact of the electron, proton and helium irradiation on the forward I-V characteristics of high-power p-i-n diode. *Microelectronics Reliability*. Vol. 43, Issue 4. pp. 537-544.
5. Kim, J.H., Lee, D.U., Kim, E.K., Bae, Y.H. (2006) Electrical characterization of proton irradiated  $p^{+}n$ - $p^{+}$  Si diode. *Physica B*. Vol. 376-377. pp. 181-184.
6. Rakhmatov, A.Z., Tashmetov, M.Y., Sandler, L.S. (2011) Vliyanie pronikayushchej radiatsii na parametry kremnievogo planarnogo vysokochastotnogo vysokovol'tnogo vypryamitel'nogo dioda [Effect of penetrating radiation on the parameters of a silicon planar high-frequency high-voltage rectifier diode]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Series: Fizika radiacionnyh povrezhdeniy i radiacionnoye materialovedeniye*. 4(98). pp.26-33
7. Rakhmatov, A.Z., Karimov, A.V., Sandler, L.S., Yodgorova, D.M., Skornyakov, S.P. (2013) Vliyanie gamma- i elektronnoy oblucheniya na klyuchevye parametry moshchnyyh vysokochastotnyh diffuzionnyh diodov [Effect of gamma and electron irradiation on key parameters of high-power high-frequency diffusion diodes]. *Komponenty i tekhnologii*. 10. pp.140-142.
8. Fizzoti, F., Colombo, E., Giudice, A.Lo., Manfredotti, C., Medunic, Z., Jaksic, M., Vittone, E. (2007) Measurement of charge collection profiles in irradiated silicon diodes by lateral IBIC technique. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B. Beam Interactions with Materials and Atoms*. Vol. 260, Issue 1. pp. 259-263. DOI: 10.1016/j.nimb.2007.02.031
9. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V., Petrov A.V., Lastovskii S.B., Fink D., Wieck A. (2008) Electrical properties of silicon diodes with  $p^{+}n$  junctions irradiated with  $^{197}\text{Au}^{26}$  swift heavy ions. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B. Beam Interactions with Materials and Atoms*. Vol. 266. Issue 23. pp. 5007-5012. DOI: 10.1016/j.nimb.2008.09.001
10. Poklonski, N.A., Gorbachuk, N.I., Tarasik, M.I., Shpakovski, S.V., Filipenia, V.A., Skuratov, V.A., Wieck, A., Kołunowicz, T.N. (2011) Effects of fluences of irradiation with 107 MeV krypton ions on the recovery charge of silicon  $p^{+}n$ -diodes. *Acta Physica Polonica A*. Vol. 120. Issue 1. pp. 111-114.
11. Kozlovskij, V.V., Yemtsev, V.V., Yemtsev, K.V., Stokan, N.B., Ivanov, A.M., Lomasov, V.N., Oganessian, G.A., Lebedev, A.A. (2008) Vliyanie elektronnoy oblucheniya na skorost' udaleniya nositelej v kremnii i karbide kremniya modifikatsii 4N [Effect of electron irradiation on the rate of carrier removal in silicon and silicon carbide of 4H modification]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. Vol. 42. Issue 2. pp. 243-248.
12. Saakyan V.A. (2008) Dejstvie razlichnyh vidov oblucheniya na parametry kremnievyyh poluprovodnikovyyh priborov [The effect of various types of irradiation of semiconductor devices]. *Izvestiya NAN Armeniya. Fizika*. Vol. 43. Issue 5. pp. 348-354.
13. Rakhmatov, A.Z. (2012) Vliyanie nejtronnogo izlucheniya na emkostnye harakteristiki kremnievogo ogranichitel'nogo dioda [Influence of neutron radiation on the capacitive characteristics of a silicon restrictive diode]. *Peterburgskiy zhurnal elektroniki*. Issue 4. pp. 53-55.
14. Muratov A.F., Rakhmatov A.Z., Merkulov A.A., Ismoilov I.R. *Sposob izgotovleniya kremniyevyykh ogranichiteley napryazheniya* [A method of manufacturing silicon voltage limiters]. Patent of the Republic of Uzbekistan No. 5328. Bulletin No. 3 of 09/30/94.
15. Rakhmatov, A.Z., Petrov, D.A., Karimov, A.V., Yodgorova, D.M., Abdulkhaev, O.A. (2012) Influence of neutron radiation on breakdown voltage of silicon voltage limiter. *Radioelectronics and Communication Systems*. New York. Vol. 55. Issue 7. pp. 332-334.
16. Rakhmatov, A.Z., Karimov, A.V., Yodgorova, D.M., Abdulkhayev, O.A. (2012) Issledovanie vliyaniya nejtronnogo oblucheniya na harakteristicheskie parametry kremnievyyh ogranichitelej napryazheniya [Investigation of the effect of

neutron irradiation on the characteristic parameters of silicon voltage limiters]. *Komponenty i tekhnologii*. Issue 5. pp.180-182.

17. Rakhmatov, A.Z. (2014) Effect of Neutron Irradiation on the Structure of Silicon p–n Junctions of Voltage Limiters. *Semiconductors*. Vol. 48. Issue 7. pp. 935-941.

18. Sze, S.M. with Kwok, K.Ng. (2006) *Physics of Semiconductor Devices*. 3rd ed. New York: Wiley. 3rd ed. Pages: 880. DOI:10.1002/0470068329

19. Fahrenbruch, A., Bube, R. (1987) *Solnechnye elementy* [Fundamentals of Solar Cells]. Translation from English. Moscow: Energoatomizdat.

20. Karimov, A.V., Yodgorova, D.M. (2005) Opredeleniye kharakteristik dvukhbar'yernykh fotodiodnykh struktur s metallopoluprovodnikovymi perekhodami [Characterization of two-barrier photodiode structures with metal-semiconductor junctions] *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*. Issue 5. pp. 27-30.

21. Karimov, A.V., Rahmatov, A.Z., Yodgorova, D.M., Kuliev, Sh.M., Bebitov R.R. (2018) The effect of radiation on fundamental parameters of a silicon-based semiconductor structure. *World Journal of Engineering Research and Technology*. Vol. 4. Issue 1. pp. 78 -81.

*Сведения об авторах:*

**Зайнобидинов Сирожиддин Зайнобидинович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Андijanского государственного университета, академик АН РУз. E-mail: prof\_sirojiddin@mail.ru

**Рахматов Ахмад Зайнидинович**, доктор технических наук, директор по производству акционерного общества «FOTON». E-mail: rahmatov@oaofoton.uz.

**Кулиев Шукурулло Мустафоевич**, младший научный сотрудник физико-технического института НПО «ФИЗИКА-СОЛНЦЕ» АН РУз. E-mail: rahmatov@oaofoton.uz.

2018 йил 29 октябрда қабул қилинган