

ВЕСЦІ НАЦЫЯНАЛЬНАЙ АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ № 4 2015  
СЕРЫЯ ФІЗІКА-МАТЭМАТЫЧНЫХ НАВУК

---

УДК 621.315.592

Ф. П. КОРШУНОВ, Н. Е. ЖДАНОВИЧ, В. А. ГУРИНОВИЧ, С. В. ЛУКША

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ  $p$ - $n$ -СТРУКТУР НА ЯДЕРНО-ЛЕГИРОВАННОМ КРЕМНИИ**

Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь,  
e-mail: korshunov@ifftp.bas-net.by, jdan@ifftp.bas-net.by, gurinovich@ifftp.bas-net.by

В работе проведены исследования влияния электронного облучения с энергией 4 МэВ на характеристики высоковольтных (до 4,5 кВ) диодных кремниевых  $p$ - $n$ -структур, изготовленных на ядерно-легированном кремнии. Получены дозовые зависимости статических и динамических характеристик  $p$ - $n$ -структур, определен коэффициент радиационных повреждений времени жизни неосновных носителей заряда  $K_{\tau}$ . С помощью метода DLTS-спектроскопии определено образование в запрещенной зоне базового  $n$ -Si шести энергетических уровней радиационных дефектов, влияющих на характеристики облученных  $p$ - $n$ -структур.

*Ключевые слова:* электронное облучение, высоковольтные диодные  $p$ - $n$ -структуры, статические и динамические характеристики, энергетические уровни.

F. P. KORSHUNOV, N. E. ZHDANOVICH, V. A. GURINOVICH, S. V. LUKSHA

**EFFECT OF ELECTRON RADIATION ON THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS  
OF THE  $p$ - $n$ -STRUCTURES BASED ON NUCLEAR-DOPED SILICON**

Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,  
e-mail: korshunov@ifftp.bas-net.by, jdan@ifftp.bas-net.by, gurinovich@ifftp.bas-net.by

The article studies the effect of electron radiation with energy of 4 MeV on the characteristics of high-voltage (4.5 kV) silicon diode  $p$ - $n$ -structures based on nuclear-doped silicon. During the research the dose dependences of the correlations between the static and dynamic characteristics of the  $p$ - $n$  structures were built, and the radiation damage coefficient of minority carrier lifetime  $K_{\tau}$  was determined. Using the DLTS-spectroscopy method, the formation in the band-gap of basic  $n$ -Si of six energy levels of radiation defects affecting the characteristics of irradiated  $p$ - $n$ -structures was determined.

*Keywords:* electron irradiation, high-voltage diode  $p$ - $n$ -structure, static and dynamic characteristics, energy levels.

**Введение.** При облучении электронами с  $E = 4$  МэВ мощных эпитаксиальных диодных  $p$ - $n$ -структур значение времени жизни неосновных носителей заряда  $\tau$  в  $n$ -базе уменьшается в 15–19 раз без существенного изменения величины прямого падения напряжения [1]. Данный экспериментальный факт объясняется оптимизацией толщины базовой области  $W$  низковольтных ( $\leq 600$  В) диодных  $p$ - $n$ -структур. Для изготовления высоковольтных диодов с обратным напряжением  $U_{\text{обр}} \geq 1500$  В используется высокоомный Si, полученный методом легирования в ядерном реакторе [2], при этом значения  $W$  указанных  $p$ - $n$ -структур существенно больше эпитаксиальных. В этой связи остается актуальным вопрос о возможности регулирования значения  $\tau$  таких диодных  $p$ - $n$ -структур радиационными методами [3].

Целью данной работы является исследование влияния облучения электронами с энергией  $E = 4$  МэВ на статические и динамические параметры высоковольтных диодных  $p$ - $n$ -структур, изготовленных на ядерно-легированном кремнии (ЯЛК).

**Методика эксперимента.** Исследуемые диодные  $p$ - $n$ -структуры были изготовлены на ЯЛК  $n$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $\rho = 300$  Ом·см по стандартной диффузионной технологии. Здесь следует отметить, что характеристики  $p$ - $n$ -структур на кремнии, полученном

ядерным легированием, близки к теоретическим, поскольку легирующая примесь распределяется равномерно по кристаллу. При обычном легировании неравномерность распределения примеси составляет до 15–20 %, а нужно, чтобы она была как можно меньше, тогда характеристики, особенно силовых приборов, будут ближе к расчетным. Кремний – наиболее широко используемый материал в производстве полупроводниковых приборов – в результате ядерных реакций можно равномерно пролегировать фосфором. Выращенный чистый кристалл кремния состоит в основном из трех его изотопов, а именно  $\text{Si}^{28}$  (92,21 %),  $\text{Si}^{29}$  (4,7 %) и  $\text{Si}^{30}$  (3,09 %). Теперь, если проанализировать все типы ядерных реакций, происходящих с изотопами кремния при облучении, оказывается, что изотоп  $\text{Si}^{30}$ , захватив нейтрон, может превращаться в стабильный изотоп фосфора  $\text{P}^{31}$ , который является донором для кремния. Кристалл кремния, легированный фосфором, имеет электронный тип проводимости ( $n$ -тип). Ядерная реакция превращения атома кремния в атом фосфора записывается следующим образом:  $\text{Si}^{30} + n \rightarrow \text{Si}^{31} \rightarrow \text{P}^{31} + \beta^-$ . Изотоп кремния  $\text{Si}^{30}$  захватывает медленный нейтрон и переходит в изотоп  $\text{Si}^{31}$ , который является нестабильным и через 2,6 ч переходит в изотоп фосфора с испусканием отрицательно заряженной  $\beta^-$ -частицы. Изотопы  $\text{Si}^{28}$  и  $\text{Si}^{29}$  при ядерных реакциях не дают других химических элементов, поэтому не изменяют свойства кремния. Надо отметить, что ядерные реакции очень эффективно протекают на медленных нейтронах ядерного реактора ( $E_n < 200$  кэВ). Если такой кристалл нагреть до температуры порядка 1070 К, то все атомы, смещенные облучением, возвратятся на прежние места за исключением  $\text{Si}^{30}$ , перешедшего в фосфор. То есть произойдет отжиг радиационных дефектов, и кристалл станет пригодным для изготовления приборов с равномерным распределением примеси.

Площадь структуры составляла  $10 \text{ мм}^2$ , ширина высокоомной  $n$ -базы – порядка 200 мкм. Облучение осуществлялось электронами с энергией 4 МэВ при плотности потока электронов  $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Температура облучения не превышала 300 К.

Изменялись основные характеристики диодов с точки зрения энергосбережения: прямое падение напряжения  $U_{пр}$  при разных значениях прямого тока в импульсном режиме (длительность импульса 400 мкс) и время жизни неосновных носителей заряда (ННЗ) методом Локса [3].

Определение параметров радиационных дефектов (концентрация, энергия активации, сечение захвата носителей заряда) в базовой области  $p$ - $n$ -структур осуществлялось методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (Deep Level Transient Spectroscopy — DLTS). При этом напряжение обратного смещения на образцах составляло  $-10 \text{ В}$ , длительность импульса заполнения ловушек носителями заряда — 0,01 с. Изменялись спектры в режимах заполнения ловушек как основными, так и неосновными носителями заряда. В первом случае напряжение импульса заполнения было 0 В, а во втором — +2 В. Установка рассчитана на измерение спектров в диапазоне температур  $78 \div 400 \text{ К}$ .

**Результаты и их обсуждение.** На рис. 1 показано изменение прямой ВАХ диодных  $p$ - $n$ -структур в результате электронного облучения. Измерения проводились в импульсном режиме. Дли-

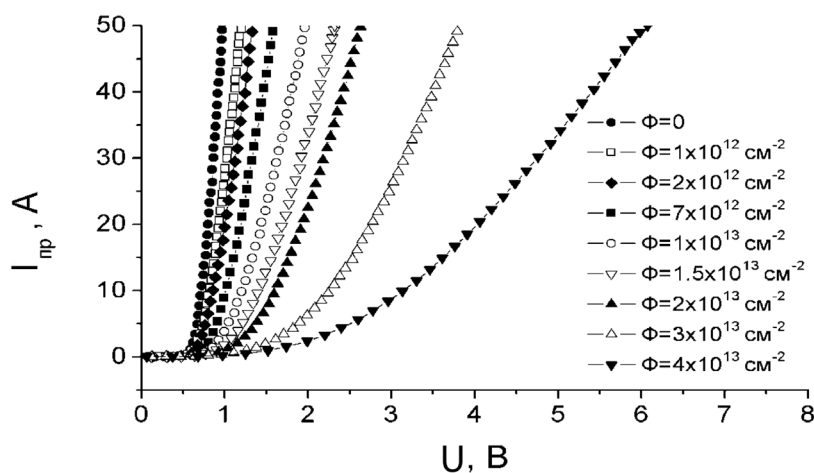


Рис. 1. Изменение прямой ВАХ диодных  $p$ - $n$ -структур в результате облучения электронами с энергией 4 МэВ

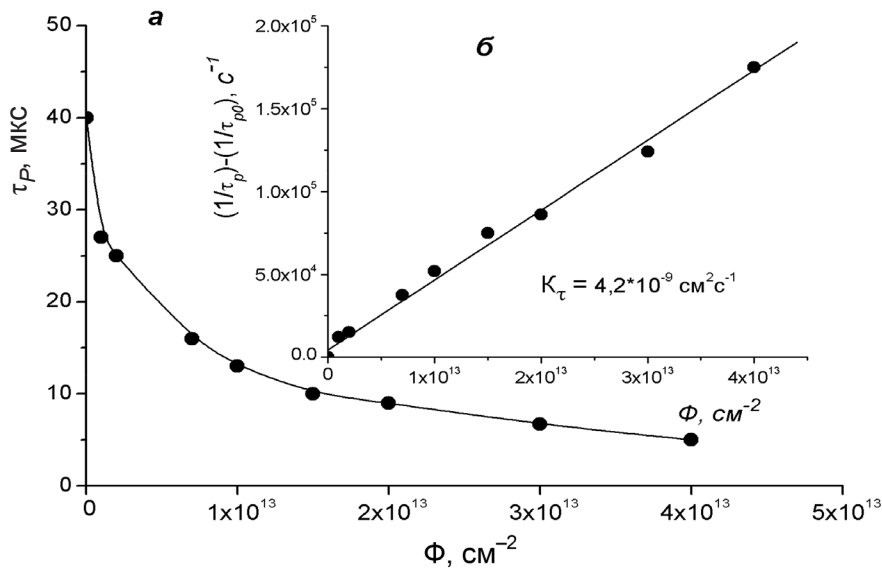


Рис. 2. Зависимость времени жизни ННЗ в *n*-базе диодных *p-n*-структур от флюенса электронного облучения с энергией 4 МэВ

тельность импульсов составляла 400 мкс с задержкой между ними 200 мс. Из полученных результатов следует, что с ростом флюенса электронов характеристика монотонно смещается в сторону больших значений прямого падения напряжения с одновременным уменьшением крутизны. Данный процесс становится особенно выраженным при значениях флюенса  $\Phi \geq 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Так, уже при  $\Phi = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  прямое падение напряжения увеличивается в 2 раза при значениях прямого тока  $I_{\text{пр}} \geq 20 \text{ А}$ .

На рис. 2 приведена зависимость времени жизни неосновных носителей заряда  $\tau_p$  в высокоомной *n*-базе диодных *p-n*-структур в зависимости от флюенса электронного облучения. Во всем исследуемом диапазоне флюенсов электронов наблюдается монотонное уменьшение значения  $\tau_p$ . Наиболее активно этот процесс происходит на начальном этапе облучения.

Так, при  $\Phi = 1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  значение времени жизни уменьшается в 3–4 раза. При дальнейшем увеличении значения  $\Phi$  скорость изменения  $\tau_p$  значительно меньше. Такой характер изменения  $\tau_p$  с ростом дозы можно связать с насыщением основного канала рекомбинации электронов и дырок в *n*-базе, обусловленным радиационными дефектами. Здесь хорошо выполняется следующая зависимость  $\tau_p(\Phi)$  (рис. 2, б):

$$1/\tau_p = 1/\tau_{p0} + K_\tau \Phi, \quad (1)$$

где  $\tau_{p0}$  – время жизни неосновных носителей заряда до облучения;  $K_\tau$  – константа радиационного изменения времени жизни неосновных носителей заряда;  $\Phi$  – флюенс электронов. Определенное значение константы оказалось равным  $K_\tau = 4,2 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ .

На рис. 3 показано соотношение между величинами времени жизни неосновных носителей заряда и прямого падения напряжения при  $I_{\text{пр}} = 20 \text{ А}$ . Из полученной зависимости  $U_{\text{пр}}(\tau)$  видно, что при значениях  $\tau > 13 \text{ мкс}$  величина  $U_{\text{пр}}$  не превышает 1,4 В.

При облучении электронами исследуемых диодных *p-n*-структур в их объеме генерируются радиационные дефекты, обладающие высокой рекомбинационной способностью. Увеличение концентрации рекомбинационных центров ведет к снижению времени жизни неосновных носителей заряда в *n*-базе *p-n*-структур и увеличению падения прямого напряжения [2]. Значение  $U_{\text{пр}}$  промышленных диодов ограничивается нормами ТУ, что соответственно лимитирует минимальные величины  $\tau_p$ , достигаемые путем радиационной обработки.

Высокая чувствительность исследуемых характеристик к проникающей радиации *p-n*-структур характерна для высоковольтных диодов, изготовленных на высокоомном материале и имеющих, как правило, большие толщины базовых областей ( $> 100 \text{ мкм}$ ). Оценим значение диффузионной длины дырок  $L_p$  в *n*-базе до и после облучения образцов флюенсом электронов  $\Phi = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ .

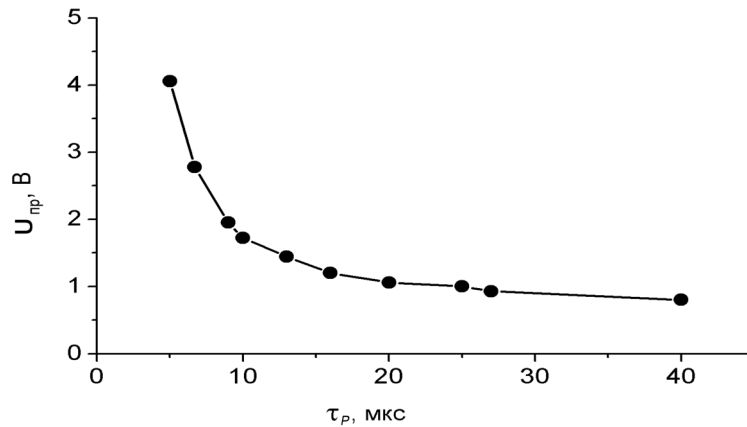


Рис. 3. Зависимость  $U_{пр}(\tau_p)$  для диодных  $p$ - $n$ -структур, облученных электронами с энергией  $E = 4$  МэВ

Для этого воспользуемся известным соотношением между коэффициентом диффузии дырок  $D_p = 12,5 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $\tau_p$  и  $L_p$  [4]:

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}. \quad (2)$$

До облучения  $\tau = 40$  мкс (см. рис. 2). Ему соответствует значение  $L_p = 223$  мкм, что больше толщины базовой области  $W \sim 200$  мкм диодных  $p$ - $n$ -структур. При высоких уровнях инжекции проводимость  $n$ -базы полностью модулируется дырками, что обеспечивает относительно небольшие значения прямого падения напряжения [5]. Это условие примерно выполняется и для исследуемых образцов, облученных флюенсами электронов  $\Phi < (1\div 2) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ .

После облучения образцов флюенсом электронов  $\Phi = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$   $\tau = 13$  мкс (см. рис. 2),  $L_p = 127$  мкм. Для кремниевых  $p$ - $n$ -структур при таком соотношении между  $L_p$  и  $W$  проводимость базовой области уже не полностью модулируется дырками [6]. Вследствие этого дальнейшее уменьшение  $L_p$  с ростом  $\Phi$  ведет к резкому увеличению прямого падения напряжения, что и наблюдается в эксперименте (см. рис. 1).

На рис. 4 приведены DLTS-спектры исследуемой структуры, облученной электронами с энергией 4 МэВ флюенсом  $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Как видно, в исследуемый образец вводится пять уровней дефектов в верхней половине запрещенной зоны ( $E1$ – $E5$ ) и один уровень в нижней половине запрещенной зоны ( $H1$ ):

$$\begin{aligned} E1 - E_c & -0,18 \text{ эВ и } \sigma_n = 1,86 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2; \\ E2 - E_c & -0,25 \text{ эВ и } \sigma_n = 4,73 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2; \\ E3 - E_c & -0,36 \text{ эВ и } \sigma_n = 2,5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2; \\ E4 - E_c & -0,41 \text{ эВ и } \sigma_n = 8,2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2; \\ E5 - E_c & -0,53 \text{ эВ и } \sigma_n = 1,55 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2; \\ H1 - E_v & +0,36 \text{ эВ и } \sigma_n = 2,5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2. \end{aligned}$$

Сравнение параметров ловушек с известными значениями для радиационных дефектов в кристаллах  $\text{Cz-Si}$  позволило сделать вывод, что ловушка  $E1$  соответствует акцепторному уровню комплекса вакансия–кислород ( $V$ – $O$ ) ( $A$ -центр), ловушки  $E2$  и  $E4$  – двум акцепторным уровням дивакансии, ловушка  $H1$  – комплексу углерод внедрения–кислород внедрения  $C_i$ – $O_i$ . Природа дефектов с уровнями  $E3$  и  $E5$  пока не установлена. Что касается уровня  $E5 - E_c - 0,53$  эВ,  $\sigma_n = 1,55 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ , то он, по всей видимости, является остаточным дефектом трансмутационного легирования. Следует заметить, что основные радиационные дефекты термостабильны, что позволяет использовать их вместо золота для увеличения быстродействия кремниевых приборов.

**Заключение.** В статье исследовано влияние облучения электронами с энергией 4 МэВ на статические и динамические параметры высоковольтных (до 4,5 кВ) кремниевых диодных  $p$ - $n$ -структур, изготовленных на ядерно-легированном кремнии с удельным сопротивлением  $\rho = 300 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Установлено, что при флюенсах электронов  $\Phi = 1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  значение времени

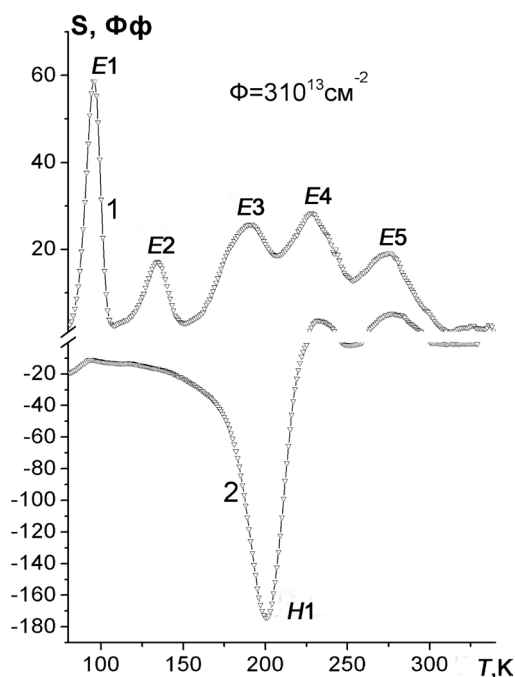


Рис. 4. DLTS-спектры облученной быстрыми электронами высоковольтной структуры в режиме обратного смещения  $U_{\text{обр}} = -10$  В (1) и инжекции  $I_{\text{пр}} = 5$  мА (2)

жизни неосновных носителей заряда в  $n$ -базе уменьшается в 3–4 раза, а величина прямого падения напряжения при токе  $I_{\text{пр}} = 20$  А не превышает 1,4 В. Константа радиационного изменения времени жизни дырок в  $n$ -базе  $K_t = 4,2 \cdot 10^{-9}$  см<sup>2</sup>с<sup>-1</sup>. Полученные результаты позволяют использовать электронное облучение с энергией 4 МэВ для увеличения быстродействия высоковольтных силовых диодов на ядерно-легированном кремнии.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Ф14-124).

### Список использованной литературы

1. Коршунов, Ф. П. Влияние электронного облучения на характеристики эпитаксиальных кремниевых  $p$ - $n$ -структур / Ф. П. Коршунов, Ю. В. Богатырев, П. М. Гурин // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. фіз.-мат. навук. – 2007. – № 3. – С. 92–95.
2. Коршунов, Ф. П. Воздействие радиации на интегральные микросхемы / Ф. П. Коршунов, Ю. В. Богатырев, В. А. Вавилов. – Минск: Наука и техника, 1986.
3. Lox, B. Transient response of  $p$ - $n$ -junction / B. Lox, S. T. Newstadter // J. Appl. Phys. – 1954. – Vol. 25. – P. 1148–1154.
4. Епифанов, Г. И. Физические основы микроэлектроники / Г. И. Епифанов. – М.: Сов. радио, 1971.
5. Гаман, В. И. Физика полупроводниковых приборов / В. И. Гаман. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1989.
6. Коршунов, Ф. П. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах / Ф. П. Коршунов, Г. В. Гатальский, Г. М. Иванов. – Минск: Наука и техника, 1978.

Поступила в редакцию 13.11.2015