

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_{τ} . 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_{τ} 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 τ 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 (≤ 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 τ 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 Si^{28} (92,21 %), Si^{29} (4,7 %) и Si^{30} (3,09 %). Теперь, если проанализировать все типы ядерных реакций, происходящих с изотопами кремния при облучении, оказывается, что изотоп Si^{30} , захватив нейтрон, может превращаться в стабильный изотоп фосфора 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 Si^{30} захватывает медленный нейтрон и переходит в изотоп Si^{31} , который является нестабильным и через 2,6 ч переходит в изотоп фосфора с испусканием отрицательно заряженной β^- -частицы. Изотопы Si^{28} и 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 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 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.

Измерялись основные характеристики диодов с точки зрения энергосбережения: прямое падение напряжения $U_{\text{пр}}$ 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 В, длительность импульса заполнения ловушек носителями заряда — 0,01 с. Измерялись 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 $78 \div 400$ 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-

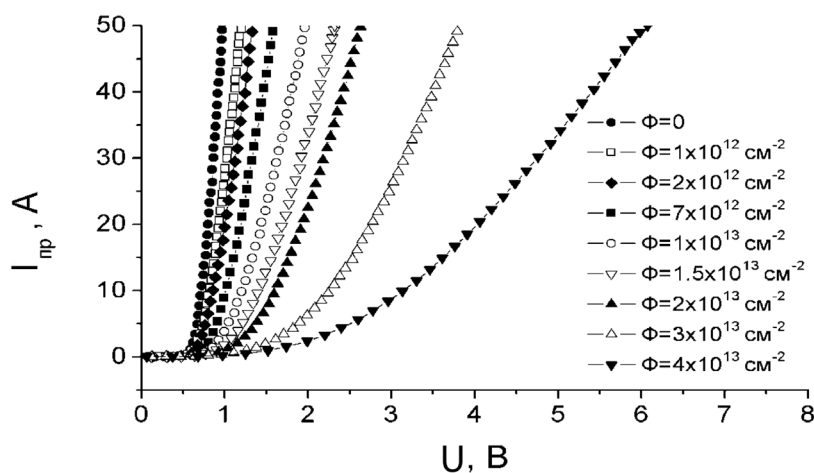


Рис. 1. Изменение прямой ВАХ диодных p - n -структур в результате облучения электронами с энергией 4 МэВ

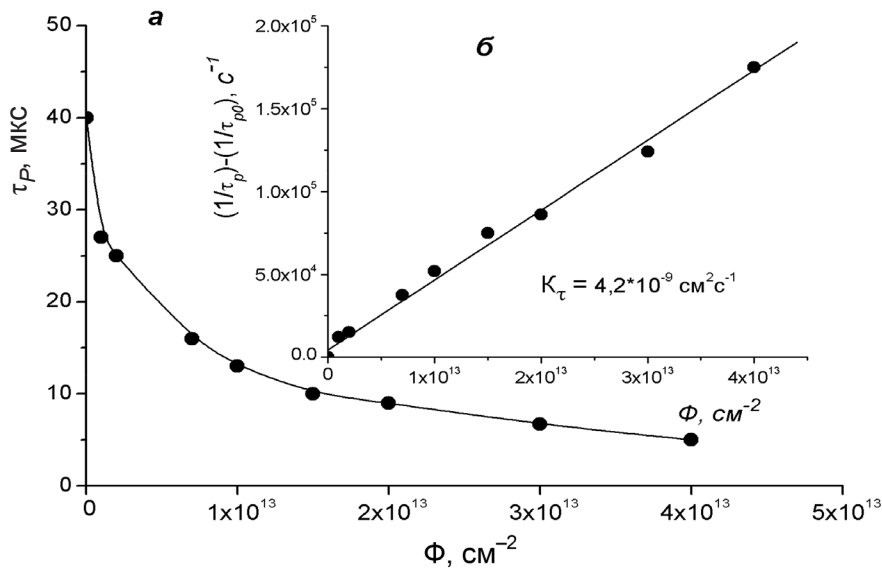


Рис. 2. Зависимость времени жизни ННЗ в *n*-базе диодных *p-n*-структур от флюенса электронного облучения с энергией 4 МэВ

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 τ_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 τ_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 Φ скорость изменения τ_p значительно меньше. Такой характер изменения τ_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 τ_{p0} – время жизни неосновных носителей заряда до облучения; K_τ – константа радиационного изменения времени жизни неосновных носителей заряда; Φ – 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 τ_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 $\Phi = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

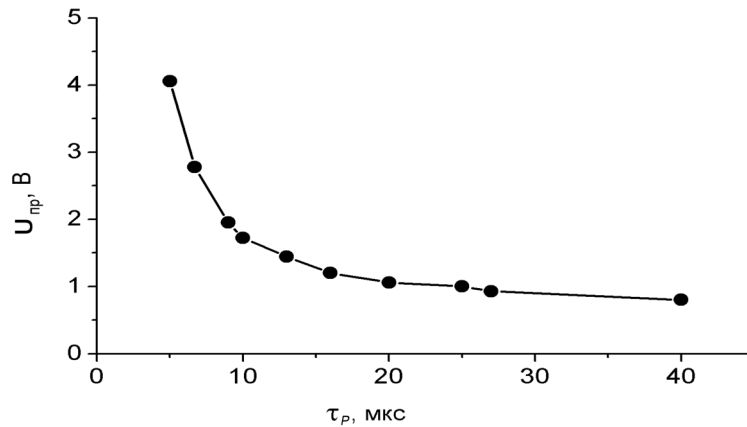


Рис. 3. Зависимость $U_{пр}(\tau_p)$ для диодных p - n -структур, облученных электронами с энергией $E = 4$ МэВ

Для этого воспользуемся известным соотношением между коэффициентом диффузии дырок $D_p = 12,5 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, τ_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 Φ 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 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

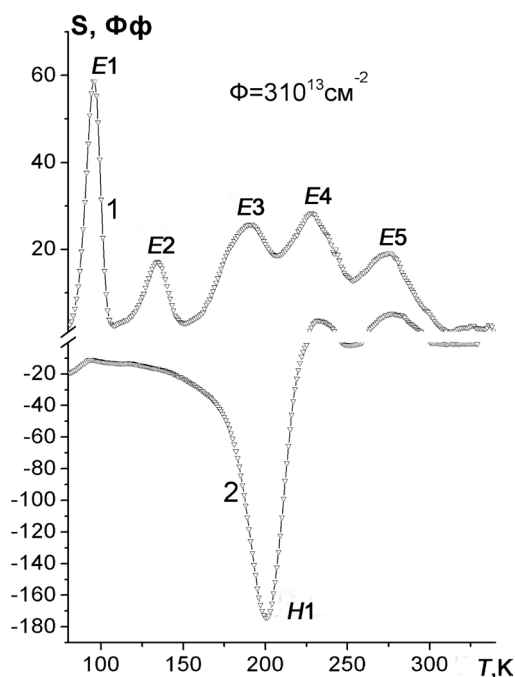


Рис. 4. DLTS-спектры облученной быстрыми электронами высоковольтной структуры в режиме обратного смещения $U_{\text{обр}} = -10$ В (1) и инжекции $I_{\text{пр}} = 5$ мА (2)

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 $K_t = 4,2 \cdot 10^{-9}$ см²с⁻¹. 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