

ДЕГРАДАЦІЯ, МЕТРОЛОГІЯ І СЕРТИФІКАЦІЯ СЕНСОРІВ

SENSOR'S DEGRADATION, METROLOGY AND CERTIFICATION

УДК 621.317.39

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ПЛАНАРНЫХ ТРАНЗИСТОРНЫХ ТЕРМОДАТЧИКОВ

Ш. Д. Курмашев¹, И. М. Викулин²

¹Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова,
65082, г. Одесса, ул. Дворянская 2, тел. (0482) — 746–66–58.

²Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова
e-mail: kurm@mail.css.od.ua

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ПЛАНАРНЫХ ТРАНЗИСТОРНЫХ ТЕРМОДАТЧИКОВ

Ш. Д. Курмашев, И. М. Викулин

Аннотация: Исследована зависимость прямого падения напряжения U и коэффициента усиления β от величины потоков электронов, нейтронов и γ -квантов, а также влияние эффективной концентрации типозадающей примеси в базовой области и толщины базы на радиационную стойкость планарно-эпитаксиальных транзисторных термодатчиков. Изучалось влияние отжига облученных структур на восстановление термочувствительных параметров. Показано, что деградация термочувствительных параметров под воздействием облучения начинается при дозах на 1.5...2 порядка выше, чем коэффициента усиления. Степень деградации U и β зависит от конструктивно-технологических параметров транзисторов.

Ключевые слова: термодатчики, транзисторы, облучение, деградация

РАДІАЦІЙНА СТІЙКІСТЬ ПЛАНАРНИХ ТРАНЗИСТОРНИХ ТЕРМОДАТЧИКІВ

Ш. Д. Курмашев, І. М. Вікулін

Анотація: Досліджували залежність прямого падіння напруги U і коефіцієнта підсилення β від величини потоків електронів, нейтронів і γ -квантів, а також вплив ефективною концентрації типозадаючої домішки в базовій області і товщини бази на радіаційну стійкість планарно-епітаксійних транзисторних термодатчиків. Вивчався вплив відпалу опроміненних структур на відновлення термочутливих параметрів. Показано, що деградація термочутливих параметрів під впливом опромінення починається при дозах на 1.5 ... 2 порядки вище, ніж коефіцієнта посилення. Ступінь деградації U і β залежить від конструктивно-технологічних параметрів транзисторів.

Ключові слова: термодатчики, транзистори, випромінювання, деградація

RADIATING RESISTANCE OF THE PLANAR TRANSISTOR
TEMPERATURE-SENSITIVE SENSORS*S. D. Kurmashev, I. M. Vikulin*

Abstract: Investigated dependence of forward bias U and amplification β from size of streams electrons, neutrons and γ — quanta, and also influence of effective concentration impurity in base area and thickness of base on radiating resistance transistor temperature-sensitive sensors. Influence of annealing of the irradiated structures on restoration of sensitive parameters was studied. It is shown that degradation of sensitive parameters under the influence of an irradiation begins at doses on 1.5 ... 2 order above, than amplification. Degree of degradation U and β depends on the constructive-technological parameters of transistors.

Keywords: sensors, transistors, irradiation, degradation

Среди широкого разнообразия датчиков физических величин особое место занимают датчики температуры [1]. Они работают на различных физических принципах и изготавливаются из различных материалов и позволяют измерять температуру в самых труднодоступных местах, даже там, где другие параметры измерить невозможно. Так, например, в активной зоне атомных реакторов преимущественно используют только датчики температуры. Показания их позволяют оценивать другие теплоэнергетические параметры (давление, плотность, уровень теплоносителя и др.).

Наиболее перспективными для использования в качестве датчиков температуры являются полупроводниковые диоды и транзисторы [2], микросхемы и гибридные микросборки на их основе [3]. Как правило, чаще всего для измерения температуры используется прямое напряжение на p - n -переходе U .

Существенными преимуществами таких датчиков являются линейность температурной зависимости, широкий диапазон рабочих температур. Стабильной является зависимость падения напряжения на p - n -переходе в прямом направлении от температуры, так как сопротивление p - n -перехода в прямом направлении в $10^4 \dots 10^5$ раз меньше, чем в обратном, и шунтирующее влияние поверхностных каналов незначительно.

Часто в качестве термоэлектрического параметра транзистора используется прямое падение напряжения на эмиттерном p - n -переходе при почти постоянном токе эмиттера при закороченном коллекторном переходе, т.е. при включении транзистора в режиме транзисторного диода. Хотя при данном включении характеристики транзистора эквивалентны

характеристикам диодов, однако их воспроизводимость выше, чем у диодов, поскольку они в меньшей степени зависят от влияния сопротивления базы и рекомбинации неосновных носителей в базовой области. В качестве температурозависимого параметра часто использует также коэффициент усиления по току β на низких и высоких частотах.

Несмотря на актуальность и интенсивные исследования данной проблемы, многие вопросы проектирования и использования транзисторных датчиков не решены. Большинство биполярных транзисторов, используемых в настоящее время в качестве термочувствительных элементов, являются серийными приборами, разработанными для других целей и, естественно, структура их не всегда оптимизирована. Не исследован вопрос зависимости прямого падения напряжения на p - n -переходе и коэффициента усиления от конструктивно-технологических параметров, недостаточно изучено влияние величины питающего тока (уровень инжекции) на термочувствительность структур.

Несмотря на необходимость измерения температуры в средах с высокой интенсивностью радиационных воздействий практически отсутствуют работы по исследованию влияния радиации на термочувствительные свойства транзисторов. Практически отсутствуют сведения о том, при каких потоках (дозах) начинается изменение U и β . Попытки оценить влияние радиации по другим параметрам термодатчиков оказались несостоятельными. В то же время, высокая чувствительность полупроводниковых материалов и приборов на их основе к воздействию радиации, а также широкое использование микроэлектронных датчиков

температуры в космической, атомной и специальной технике выдвинуло данную проблему как одну из актуальных в области полупроводниковых термодатчиков.

В настоящей работе изучали зависимость U и β от величины потоков электронов, нейтронов и γ -квантов, а также влияние эффективной концентрации типозадающей примеси в базовой области (концентрации основных носителей заряда) и толщины базы на радиационную стойкость планарно-эпитаксиальных транзисторных термодатчиков. Изучалось влияние отжига облученных структур на восстановление термочувствительных параметров.

Проведены экспериментальные исследования влияния облучения электронами, нейтронами и γ -квантами на прямое падение напряжения на эмиттерном переходе n - p - n -транзисторов и коэффициент усиления β . Использовались транзисторы, изготовленные по планарно-эпитаксиальной технологии со следующими параметрами: поверхностное сопротивление эмиттерной области — 0.5 Ом/□, глубина залегания коллекторного p - n -перехода ~ 0.1 мм. Поверхностное сопротивление базовой области варьировалось от 25 до 160 Ом/□, толщина базы — от 1.0 мкм до 3.0 мкм. Влияние облучения оценивалось по изменению контролируемого параметра (U , β) после облучения. Измерение коэффициента усиления проводили при напряжении на коллекторе $U_k = 3$ В и температуре $T = 293$ К.

Для исследования влияния потока электронов на исследуемые параметры транзисторы были подвергнуты воздействию потока электронов $\Phi_e = 10^{12}$, 10^{14} , 10^{15} , $5 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$ с энергией 5 МэВ. Облучение образцов производили на линейном ускорителе «Электроника» ЭЛУ-4. Результаты измерений контролируемых параметров представлены на рис. 1 и рис. 2. (графики на рисунках строились методом наименьших квадратов). Как видно, изменение коэффициента усиления β наблюдается уже при потоках $\Phi_e > 5 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$, тогда как прямое падение напряжения U слабо меняется при увеличении потока радиации практически во всем интервале изменения возбуждающего фактора. Спад U характерен для термочувствительных структур с тонкой базой ($w < L$, где w — толщина базы, L — диффузионная длина неосновных носителей заряда), работающих при очень малых токах инжекции.

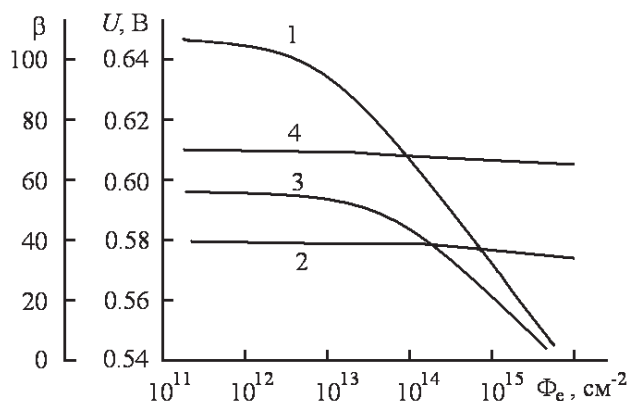


Рис. 1. Изменение параметров β (1, 3) и U (2, 4) под воздействием потока электронов энергией 5 МэВ ($N = 1.5 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$). Толщина базы w : 1, 2 — 1 мкм; 3, 4 — 2.1 мкм.

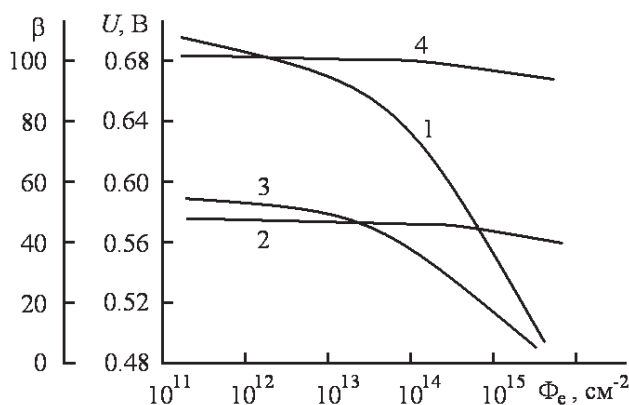


Рис. 2. Изменение параметров β (1, 3) и U (2, 4) под воздействием потока электронов энергией 5 МэВ ($w = 1.5$ мкм). Эффективная концентрация примеси N в базовой области: 1, 2 — $7 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$; 3, 4 — $2 \cdot 10^{19}$ см $^{-3}$.

Изучение влияния γ -квантов (энергия 1.25 МэВ) экспозиционными дозами 10^4 , 10^5 , 10^6 , 10^7 , 10^8 , 10^9 , 10^{10} Р на характеристики термочувствительных структур производили на установке К 10 000. Как следует из результатов исследований, деградация коэффициента усиления β наблюдается при дозах $D_\gamma > 10^4$ Р, тогда как прямое падение напряжения практически не изменяется при $D_\gamma = 10^8$ Р. Затем оно начинает медленно уменьшаться, причем наибольшие изменения наблюдаются у транзисторов с высокой концентрацией примеси в базовой области и с толстой базой. Аналогичным образом зависит от влияния γ -квантов и термочувствительность: при $D_\gamma < 10^9$ Р $\Delta U / \Delta T$ практически не изменяется, при $D_\gamma > 10^9$ Р чувствительность несколько уменьшается. При этом по аналогии с β наибольшие ее изменения ($\sim 4\%$) наблюдаются у транзисторов с толстой базой и высокой концентрацией примеси в ней.

Источником потока быстрых нейтронов с энергией 14.5 МэВ был генератор нейтронов типа НГ-150. Образцы подвергались воздействию потоков $\Phi_n = 10^{12}, 10^{13}, 10^{14}$ н·см⁻². Установлено, что прямое падение напряжения для образцов с $w > 2.1$ мкм и поверхностным сопротивлением базы $R_{сб} = 25 \pm 30$ Ом/□ начинает медленно уменьшаться лишь при $\Phi_n > 10^{14}$ н·см⁻² (у других образцов напряжение U не изменялось). Коэффициент усиления β при этом уменьшается примерно в 2 раза от первоначального значения, а деградация его начинается уже при $\Phi_n > 10^{12}$ см⁻². Изменение термочувствительности при воздействии потока нейтронов наблюдается лишь у транзисторов, у которых уменьшается U (уменьшение не превышает 6 %).

Таким образом, для обеспечения высокой радиационной стойкости термочувствительных транзисторов, действующих на основе зависимости U от T , необходимо обеспечивать меньшие p_p и w , т.е. обеспечивать те же требования, что и для получения максимальной термочувствительности.

Обсуждая полученные экспериментальные результаты, следует отметить, что, как известно, основным процессом дефектообразования у полупроводников с относительно небольшой энергетической запрещенной зоной и сравнительно большой пороговой энергией дефектообразования (кремний) является объёмный механизм повреждения кристаллической структуры кремния в результате смещения атомов.

Образование дефектов в кремнии сопровождается возникновением дополнительных энергетических уровней в запрещенной зоне полупроводника. Глубокие уровни вблизи середины запрещенной зоны (генерационно-рекомбинационные уровни) обладают большим сечением захвата неравновесных носителей заряда. Так, сечение прямой рекомбинации (зона проводимости — валентная зона) на два порядка меньше, чем сечение рекомбинации через глубокий уровень. Поэтому время жизни неравновесных носителей заряда в данном случае является наиболее чувствительным к облучению электрофизическим параметром.

Действие излучения проявляется в изменении эффективной концентрации свободных носителей, времени жизни неосновных носителей τ и подвижности носителей заряда μ (рис. 3). Видно, что ухудшение электрических характеристик кремниевых приборов при

облучении обусловлено, главным образом, эффектом удаления носителей заряда и деградацией времени жизни, что соответствует литературным данным [4–6]. Чем больше начальное время жизни τ_0 (рис. 3, графики 3 и 4), тем скорость изменения термочувствительных параметров выше.

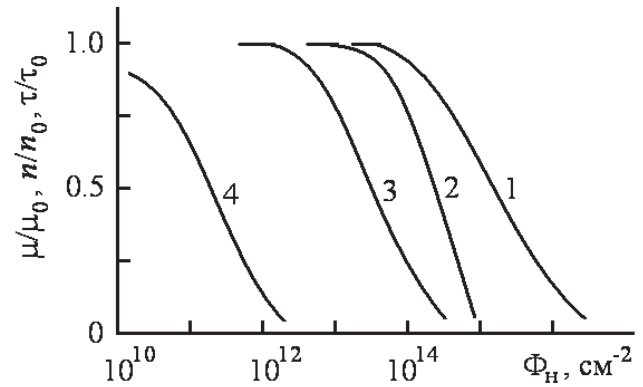


Рис. 3. Изменение параметров кремния n -типа с удельным сопротивлением 1 Ом·см при облучении нейтронами с энергией ~ 10 кэВ: 1 — подвижность; 2 — концентрация основных носителей заряда; 3, 4 — время жизни неосновных носителей при $\tau_0 = 10^{-9}$ с и $\tau_0 = 10^{-6}$ с соответственно (низкий уровень инжекции).

Оценить влияние облучения на напряжение U термочувствительных транзисторов можно, приняв во внимание, что это напряжение состоит из прямого напряжения, падающего собственно на p - n -переходе и падения напряжения на сопротивлении базовой области. Расчеты показывают, что у диодов с тонкой базой, работающих при низком уровне инжекции, модуляции сопротивления базы при облучении не происходит [7].

Изменение величины падения напряжения на базовой области вследствие облучения

$$\Delta U_B = Jw\rho_0(e^{K_p\Phi} - 1). \quad (1)$$

Здесь ρ_0 — удельное сопротивление базовой области до облучения; K_p — коэффициент радиационного повреждения удельного сопротивления, для кремния равный $4.2 \cdot 10^{-3} N^{-0.73}$. При плотности тока $J = 1.14$ А/см², $w = 0.8 \cdot 10^{-4}$ см, $\rho_0 = 0.06$ Ом·см, $N = 10^{18}$ см⁻³ при потоке нейтронов $\Phi_n = 10^{12}$ см⁻² изменение напряжения при облучении составляет $\Delta U_B = 5.6 \cdot 10^{-5} U_{B0}$. При $\Phi_n = 10^{14}$ см⁻² изменение напряжения $\Delta U_B = 5.7 \cdot 10^{-3} U_{B0}$, т.е. можно считать, что при воздействии облучения падение напряжения на базовой области практически не изменяется.

При расчете прямого падения напряжения на p - n -переходе считается, что оно определяется зависимостью от облучения только через эффективную концентрацию легирующей примеси в базовой области (изменением подвижности, как эффектом третьего порядка малости, обычно пренебрегают [7]). Прямое падение напряжения на p - n -переходе определяется соотношением [2]

$$U = \frac{E_g}{q} - \frac{ckT}{q} \ln \frac{CT^{4-\alpha}}{Nw}. \quad (2)$$

Здесь c — коэффициент, зависящий от механизма протекания тока через p - n -переход ($1 < c < 2$); C — постоянная, не зависящая от температуры (она пропорциональна подвижности носителей заряда μ_{n0} при температуре $T_0 = 300$ К); α — показатель степени температурной зависимости подвижности, зависящий от типа материала и степени его легирования $\mu_n = \mu_{n0}(T_0/T)^\alpha$.

Из приведенных результатов (рис. 1, 2) видно, что параметр U обладает радиационной стойкостью на 1.5...2 порядка выше, чем β , что объясняется зависимостью U и β от различных радиационно-чувствительных параметров транзисторной структуры. Напряжение U определяется зависимостью N и μ от Φ . Радиационное изменение коэффициента усиления β зависит, в основном, от времени жизни неосновных носителей в базовой области, наиболее чувствительного к воздействию облучения параметра [8]:

$$\frac{1}{\beta} \approx \frac{\rho_{\text{э}} w}{\rho_{\text{б}} \sqrt{D_{\text{рэ}} \tau_{\text{рэ}}}} + \frac{w^2}{2D_{\text{нб}} \tau_{\text{нб}}}. \quad (3)$$

Здесь $\rho_{\text{э}}$, $\rho_{\text{б}}$ — удельное сопротивление эмиттера и базы; $D_{\text{рэ}}$ и $\tau_{\text{рэ}}$ — коэффициент диффузии и время жизни дырок в эмиттере; $D_{\text{нб}}$ и $\tau_{\text{нб}}$ — коэффициент диффузии и время жизни электронов в базе.

Поскольку деградация $\tau_{\text{н}}$ начинается при дозах, на 1.5–2 порядка меньших, чем изменение подвижности и концентрации основных носителей в базе (рис. 3), то и изменения прямого падения напряжения и коэффициента усиления при воздействии ионизирующего излучения проходят аналогично.

У транзисторов с эффективной концентрацией типозадающей примеси в базе $\sim 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ прямое напряжение на эмиттерном p - n -переходе уменьшается на 1...2 мВ при действии по-

тока нейтронов $\sim 10^{13} \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}$ и на 7...9 мВ — при потоке $\sim 10^{14} \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}$. Это связано с увеличением тока насыщения эмиттерного p - n -перехода вследствие уменьшения концентрации основных носителей в базе в результате облучения. Термочувствительность $\Delta U/\Delta T$ снижается при этом на 5...10 %. У транзисторов с меньшей концентрацией примеси ($\sim 7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) и тонкой базой ($w < 2 \text{ мкм}$) при указанных потоках изменения $\Delta U/\Delta T$ не наблюдается. Причина этого по-видимому состоит в том, что одновременно с уменьшением концентрации p в базе под действием радиации происходит расширение базы (рост w) в область коллектора, вследствие снижения концентрации основных носителей заряда в самом коллекторе. Поэтому произведение Nw в соотношении (2) меняется слабо и термочувствительность стабильна.

Сравнительные исследования влияния нагрева (отжига) на восстановление параметров U и β транзисторов, облученных γ -квантами, показало, что полное восстановление U происходит при температурах $T > (410...420) \text{ К}$, тогда как для полного восстановления β необходимо проводить отжиг при $T > 620 \text{ К}$. Эти данные позволяют утверждать, что деградация коэффициента усиления β обусловлена образованием под действием облучения A -центров, температура отжига которых составляет (610...650) К, тогда как изменение напряжения U происходит вследствие образования E -центров, отжиг которых происходит при более низких температурах.

Анализ влияния облучения на термочувствительные транзисторы с различными конструктивно-технологическими параметрами показал, что деградация U , $\Delta U/\Delta T$ транзисторов с $w \geq 2.1 \text{ мкм}$ и поверхностным сопротивлением базы $R_{\text{сб}} = 25...30 \text{ Ом}/\square$ начинается при меньших величинах воздействующих факторов, чем у образцов с меньшими w и $R_{\text{сб}}$. Следовательно, для повышения радиационной стойкости термочувствительных транзисторов необходимо уменьшать толщину базы и концентрацию примеси в базовой области.

Если рекомендация уменьшения w носит общий характер, то условие уменьшения концентрации примеси для повышения радиационной стойкости не является безоговорочным для всех полупроводниковых приборов. По-видимому, существует оптимальное значение концентрации примеси в базовой области, обеспечивающее максимум на зависимости ра-

диационной стойкости от N , т.е. наибольшую радиационную стойкость. Об этом свидетельствуют как результаты проведенных исследований, так и результаты исследований радиационной стойкости диодов с высокоомной базой. Оптимальное значение N можно найти, если приравнять скорости изменения напряжения на p - n -переходе и падения напряжения на базовой области, которые, как известно, имеют разные знаки:

$$\frac{dU_{p-n}}{d\Phi} = \frac{dU_B}{d\Phi}. \quad (4)$$

Поскольку U_{p-n} и U_B зависят также от w и I , то данный экстремум является частным. Нахождение же главного экстремума является сложной задачей. Степень влияния облучения на параметры термочувствительных транзисторов при одинаковых значениях N и w зависит от градиента концентрации примеси в переходе. Этим и объясняется более высокая радиационная стойкость приборов, база которых сформирована диффузией бора в отличие от приборов, база которых сформирована диффузией алюминия.

В работе [7] показано, что наибольшую радиационную стойкость имеют диоды с сильнолегированной базой, т.е. низковольтные. Для повышения радиационной стойкости диодов рекомендуется делать диоды с тонкой базой и стараться, чтобы они работали при большом уровне инжекции, что задается режимом работы диода при прямом смещении. Однако, для данного случая в этой рекомендации заложено некоторое противоречие: работа термодатчиков наиболее эффективна при низком уровне легирования базы и малом уровне инжекции. Таким образом, при обсуждении радиационной стойкости термодатчиков следует выбирать некоторый оптимальный вариант.

Одним из основных требований, предъявляемых к технологии производства термочувствительных транзисторов является обеспечение высокой воспроизводимости информационного параметра — падения напряжения на прямо смещенном эмиттерном p - n -переходе. На практике наблюдается значительный разброс этого параметра, что сказывается на проценте выхода годных приборов. Попытки улучшить воспроизводимость величины прямого падения напряжения с помощью известных методов — термотренировки и электротренировки

оказались малоэффективными, т.к. позволяют в определенной мере лишь застабилизировать изменение термочувствительного параметра во времени. Экспериментально установлено, что облучение термочувствительных транзисторов потоком электронов $10^{14} \dots 10^{15} \text{ см}^{-2}$ энергией 5...10 МэВ с последующим отжигом в течение 2...3 часов позволяет существенно повысить воспроизводимость выходного параметра.

Показано, что между прямым падением напряжения, коэффициентом усиления и термочувствительностью существует достаточно сильная корреляционная связь, которая нарушается при воздействии облучения. Дegradация термочувствительных параметров (прямое падение напряжения) под воздействием облучения начинается при дозах на 1.5...2 порядка выше, чем коэффициента усиления. Степень деградации параметров термодатчика зависит от конструктивно-технологических параметров транзисторов.

Литература

1. *Шарапов В. М., Викулин И. М., Курмашев Ш. Д., Датчики.* — Киев: Брама, 2008. — 1072 с.
2. *Викулина Л. Ф., Глауберман М. А. Физика сенсоров температуры и магнитного поля.* — Одесса: Маяк, 2000. — 244 с.
3. *Мокрицкий В. А., Завадский В. А., Влияние радиационной обработки на параметры интегральных преобразователей температуры // Технология и констр. в электронной аппаратуре.* — 2001. — № 1. — С. 25–27.
4. *Маслов Н. И., Неклюдов И. М., Особенности радиационного повреждения кремниевых детекторов высокоэнергетическими электронами // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение.* — 2002. — С. 53–56.
5. *Emtsev V. V., Ehrhart P., Poloskin D. S., Dedek U., Electron irradiation of heavily doped silicon: group-III impurity ion pairs // Physica B: Condensed Matter.* — 2000. — Vol. 273–274. — P. 287–290.
6. *Emtsev V. V., Ehrhart P., Poloskin D. S., Emtsev K. V., Comparative studies of defect production in heavily doped silicon under fast electron irradiation at different temperatures // J. Mater.Sci.: Mater Electron.* — 2007. — Vol. 18. — P. 711–714.
7. *Вологдин Э. Н., Лысенко А. П., Радиационные эффекты в некоторых классах полупроводниковых приборов.* — Москва: МГИЭМ., 2001. — 70 с.
8. *Викулин И. М., Стафеев В. И., Физика полупроводниковых приборов.* — Москва: Радио и связь, 2000. — 270 с.