

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИИ НА ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Викулин И.М., Горбачев В.Э., Курмашев Ш.Д.

*Одесская национальная академия связи им. А.С.Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.
physonat@gmail.com*

ВПЛИВ РАДІАЦІЇ НА ТЕРМОЧУТЛИВІСТЬ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ

Вікулин І.М., Горбачов В.Е., Курмашев Ш.Д.

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.
physonat@gmail.com*

INFLUENCE OF RADIATION ON THERMOSENSITIVITY OF FIELD-EFFECT JUNCTION TRANSISTORS

Vikulin I.M., Gorbachev V.E., Kurmashev S.D.

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.
physonat@gmail.com*

Аннотация. Исследовано влияние концентрации примеси, задающей тип проводимости канала на радиационную стойкость детекторов на основе полевых транзисторов. Измерены зависимости тока насыщения стока транзисторов с управляющим *p-n*-переходом от величины потоков электронов, нейтронов и γ -квантов. Получено, что деградация тока насыщения стока транзисторов с управляющим *p-n*-переходом под воздействием нейтронов начинается при потоках почти на два порядка меньших, чем под воздействием электронов. Облучение приводит не только к возрастанию термочувствительности детекторов в 2...5 раз, но и к уменьшению разброса ее значений среди различных образцов. Деградация характеристик полевых МДП-транзисторов со встроенным каналом начинается при потоках облучения на два порядка меньших, чем деградация транзисторов с управляющим *p-n*-переходом. Воздействие малыми дозами γ -квантов не уменьшает разброс параметров МДП-транзисторов, а γ -облучение значительными экспозиционными дозами приводит к улучшению воспроизводимости тока насыщения стока и термочувствительности полевых МДП-транзисторов.

Ключевые слова: детекторы, полевые транзисторы, ионизирующее облучение, деградация параметров детекторов.

Анотація. Досліджено вплив концентрації домішки, яка задає тип провідності каналу на радіаційну стійкість детекторів на основі польових транзисторів. Виміряно залежності струму насичення стоку транзисторів з керівним *p-n*-переходом від величини потоків електронів, нейтронів і γ -квантів. Отримано, що деградація струму насичення стоку транзисторів з керівним *p-n*-переходом під впливом нейтронів починається з потоками майже на два порядки менших, ніж під впливом електронів. Опромінення призводить не лише до зростання термочутливості детекторів у 2...5 разів, але і до зменшення розкиду її значень серед різних зразків. Деградація характеристик польових МДП-транзисторів з вбудованим каналом починається з потоками опромінення на два порядки менших, ніж деградація транзисторів з керівним *p-n*-переходом. Дія малими дозами γ -квантів не зменшує розкид параметрів МДП-транзисторів, а γ -опромінення значними експозиційними дозами призводить до поліпшення відтворюваності струму насичення стоку і термочутливості польових МДП-транзисторів.

Ключові слова: детектори, польові транзистори, іонізуюче опромінювання, деградація параметрів детекторів.

Abstract. Influence of concentration of impurity, which defines of conductivity type in channel on the radiation resistance of thermal sensors, which based on field-effect junction transistors. Dependences of saturation drain current of transistors with the *p-n*-junction gate from the value of streams of electrons, neutrons and γ -quanta are measured. Degradation of saturation drain current of transistors with the *p-n*-junction gate under exposure of neutrons begins at streams almost on two orders less, than it was got under exposure of electrons. An irradiation leads not only to growing of thermo sensitivity of sensors in 2...5 times but also to decreasing of variation of her values among different samples. Degradation of characteristics of the field-effect MOS-transistors with a built-in channel begins at the streams of irradiation on two orders of less, than degradation of transistors with the *p-n*-junction gate. Influence by the small doses of γ -quanta does not diminish variation of parameters of MOS-transistors, but the γ -irradiation by considerable exposure doses leads to the improvement of reproducibility of saturation drain current and thermo sensitiveness the field-effect MOS-transistors.

Key words: thermal sensors, transistors, irradiation, degradation of sensors parameters.

Среди широкого разнообразия датчиков физических величин наибольшей чувствительностью обладают детекторы, выполненные на основе транзисторов [1]. В предыдущей нашей работе [2] были представлены результаты исследований влияния радиации на термочувствительность биполярных транзисторов. Однако датчики температуры, выполненные на основе полевых транзисторов (ПТ), оказываются еще более чувствительными [3]. В настоящее время практически отсутствуют работы по исследованию влияния радиации на термочувствительные свойства ПТ. Вместе с тем, расширение области применения высокочувствительных микроэлектронных датчиков и подверженность ПТ радиационным изменениям выдвинуло данную проблему как одну из актуальных.

Цель статьи – исследовать влияние облучения потоками электронов, нейтронов и γ -квантов в пассивном режиме на ток насыщения и термочувствительность ПТ.

Под действием радиационного облучения полупроводниковых *p-n*-структур в их базовой области, изготовленной на основе кремния *n*-типа, возникают комплексы дефектов типа А-центров, Е-центров, дивакансий и др. Эти комплексы создают глубокие уровни в запрещенной зоне – центры рекомбинации носителей заряда. Количество всех этих дефектов возрастает при увеличении доз облучения. Анализ экспериментальных данных показывает [4], что А-центры образуются при меньших дозах облучения, чем Е-центры и дивакансии.

Деградация основных параметров полупроводниковых материалов в зависимости от потока радиационного облучения Φ описывается эмпирическими соотношениями:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau} &= \frac{1}{\tau_0} + K_\tau \cdot \Phi; \\ N &= N_0 \cdot \exp(-K_N \cdot \Phi); \\ \frac{1}{\mu} &= \frac{1}{\mu_0} + K_\mu \cdot \Phi, \end{aligned} \quad (1)$$

где N_0 , τ_0 , μ_0 – концентрация типозадающей примеси, время жизни носителей заряда и их подвижность до облучения; K_N , K_τ , K_μ – коэффициенты радиационного изменения концентрации примеси, задающей тип проводимости, времени жизни неосновных носителей заряда и их подвижности. Коэффициенты K_N , K_τ , K_μ зависят от параметров полупроводникового материала, и различны для разных типов и диапазонов потоков радиационного воздействия [4]. Исследования показали, что время жизни носителей заряда τ очень чувствительно к появлению А-центров рекомбинации, поэтому τ является параметром наиболее чувствительным к действию радиации. Резкое уменьшение концентрации носителей заряда после радиационного воздействия связано с образованием Е-центров и дивакансий, поскольку эти комплексы удаляют из зоны проводимости *n*-кремния по два электрона. Деградацией же подвижности μ можно пренебречь, как эффектом третьего порядка малости по сравнению с изменением N и τ [4].

По своей конструкции существуют два основных типа ПТ: с управляющим *p-n*-переходом (рис.1,*а*) и с изолированным затвором (рис.1,*б*), когда металлический затвор отделен от

полупроводникового канала слоем диэлектрика (МДП-транзисторы). Поскольку они имеют противоположный знак температурной чувствительности [3], представляется интересным сравнить изменения характеристик обоих типов ПТ при радиационном воздействии.



Рисунок 1 – Схематическая конструкция ПТ

с управляющим *p-n*-переходом (а) и МДП-транзистора со встроенным каналом (б)

Если в качестве сенсорного элемента датчика используют ПТ с управляющим *p-n*-переходом (рис. 1, а), то информационным параметром такого датчика является ток насыщения стока транзистора I_n , а включают его по двухполюсной схеме, когда затвор транзистора замкнут с его истоком $U_3 = 0$. При таком включении ток стока транзистора не зависит от времени жизни носителей заряда, а определяется только их концентрацией n и подвижностью μ в *n*-канале [5]:

$$I_n = \frac{U_{30}}{3R_{к0}} = An^2\mu, \quad (2)$$

где U_{30} – напряжение отсечки; $R_{к0}$ – максимальное сопротивление канала; A – постоянная.

Тогда изменение тока насыщения стока ПТ с управляющим *p-n*-переходом при радиационном облучении, с учетом зависимости $N(\Phi)$ и $\mu(\Phi)$ из (1), можно описать следующим выражением:

$$I_{n\Phi} = \frac{I_{n0} \cdot \exp(-2K_N\Phi)}{1 + K_\mu\mu_0\Phi}, \quad (3)$$

где I_{n0} – ток насыщения до облучения; $I_{n\Phi}$ – ток насыщения после облучения.

Если принять во внимание малость изменений подвижности, получаем, что влияние облучения на информационный параметр сенсора определяется, в основном, уменьшением эффективной концентрации типозадающей примеси N вследствие радиационной генерации Е-центров и дивакансий. Поэтому следует ожидать, что ПТ в меньшей степени, чем биполярные транзисторы, подвержены влиянию облучения.

Коэффициент радиационного изменения концентрации типозадающей примеси канала K_N имеет наибольшее значение при облучении нейтронами [4]. На рис. 2 представлены расчетные зависимости относительного изменения тока насыщения от величины потока нейтронов при различных значениях концентрации примеси в канале. Видно, что при тех же значениях интенсивности облучения для малых

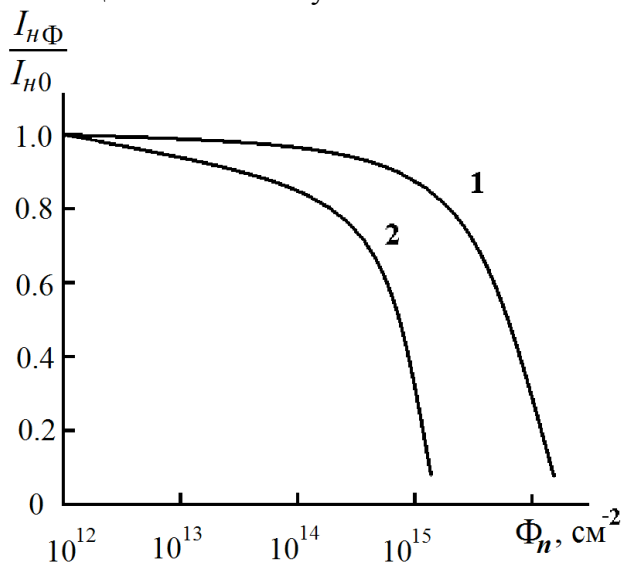


Рисунок 2 – Расчетные зависимости относительного изменения тока насыщения стока ПТ от величины потока нейтронов. Начальная концентрация примеси в канале N_0 : (1) 10^{17} см^{-3} , (2) 10^{16} см^{-3}

концентрацій типозадаючої приміси в каналі радіаційна деградація ПТ починається раніше і проходить більш інтенсивно. Це пов'язано з тим, що навіть при невеликих концентраціях радіаційно-генерована заряджена вакансія в кремнії значно швидше інших дефектів дифундує по кристаллу, «знаходить» в першу чергу примісні атоми, і утворює з останніми більш стійкі комплекси – Е-центри рекомбінації.

Для експериментальних досліджень впливу облучення на ток насичення ПТ з управляючим *p-n*-переходом були використані транзистори КП202. Спочатку вимірювався $I_{н0}$ при $T = 293$ К до облучення. Згодом зразки були розділені на 15 груп по три транзистора в кожній. Зразки кожної групи були піддані облученню тільки однієї величини потоку випромінювання одного виду впливаючого фактора.

Облучення перших п'яти груп зразків потоком електронів Φ_e величиною 10^{12} , 10^{13} , $5 \cdot 10^{13}$, 10^{14} і $5 \cdot 10^{15}$ см⁻² з енергією 5 МэВ проводилося на лінійному прискорювачі «Електроніка». Облучення інших п'яти груп зразків потоком нейтронів Φ_n величиною 10^{12} , $5 \cdot 10^{12}$, 10^{13} , $5 \cdot 10^{13}$, $5 \cdot 10^{14}$ см⁻² з енергією 1.1 МэВ проводилося на реакторі ВВР-М. Облучення останніх п'яти груп зразків γ -квантами з енергією 1 МэВ і експозиційною дозою D_γ величиною 10^4 , 10^5 , 10^6 , 10^7 , 10^8 Р проводилося на установці К100000. Після радіаційного впливу вимірювання $I_{нФ}$ виконувалися при тих же режимах і умовах, що і вимірювання початкового $I_{н0}$.

На рис. 3 представлені експериментальні залежності відносного зміння току насичення від величини потоку електронів, нейтронів, γ -квантів. Як видно з представлених графіків, дані експериментальних досліджень впливу облучення на ток насичення стока I_n добре узгоджуються з розрахунковими даними.

З рис. 3 видно, що радіаційне дефектоутворення в каналі транзистора раніше всього починається при облученні нейтронами ($\Phi_n \sim 5 \cdot 10^{12}$ см⁻²). Нейтрони викликають і найбільші зміни току I_n . Це пояснюється тим, що нейтрони найбільш масивні, тому вони викликають більш інтенсивне дефектоутворення в каналі. Відповідно, для нейтронів в співвідношенні (3) коефіцієнт зміння концентрації типозадаючої приміси каналу K_N має найбільше значення [4]. Під впливом потоку електронів дефекти в каналі ПТ починають утворюватися при потоках $\Phi_e \sim 10^{13}$ см⁻², а при рентгеновському облученні при дозах $D_\gamma \sim 10^5$ Р.

Для проведення експериментальних досліджень впливу облучення на термочутливість ПТ ($\Delta U/\Delta T$) була використана мостова схема [3], що складається з чотирьох польових транзисторів. В одну діагональ мостової схеми включалися два еталонних ПТ, які поміщалися в термостат, де підтримувалася постійна температура $T = 293$ К, а в другу включалися попарно досліджувані транзистори. При температурі досліджуваних транзисторів $T = 293$ К мост балансувався, а при температурі

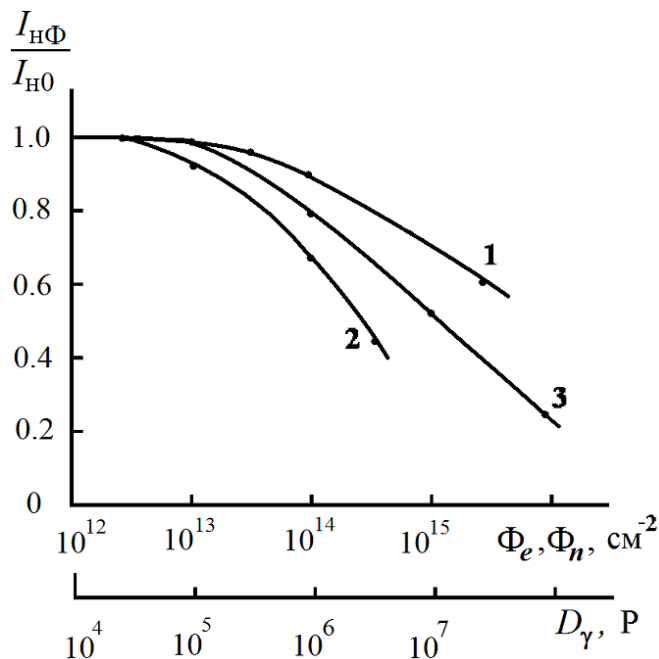


Рисунок 3 – Експериментальні залежності відносного зміння току насичення стока ПТ з управляючим *p-n*-переходом під впливом потоку електронів (1), нейтронів (2), γ -квантів (3)

$T = 303$ К измерялся разбаланс мостовой схемы, на основании чего определялась термочувствительность транзисторов. Значения термочувствительности до облучения для различных мостов составляли от 12,5 до 133 мВ/К.

После этого исследуемые транзисторы в пассивном режиме были подвергнуты воздействию потока электронов, γ -квантов и нейтронов. Далее снова определяли термочувствительность мостов. Результаты исследований показали, что облучение датчиков температуры приводит к возрастанию их чувствительности в 2...5 раз при потоках $\Phi_e = 10^{14} \dots 10^{15} \text{ см}^{-2}$, $\Phi_n = 10^{13} \dots 10^{14} \text{ см}^{-2}$, $D_\gamma = 10^7 \dots 10^8 \text{ Р}$. Облучение приводит не только к возрастанию термочувствительности, но и к уменьшению разброса ее значений среди различных датчиков, т.е. транзисторы имеющие высокую чувствительность до облучения, увеличили ее после облучения в 1,1...3 раза в отличие от датчиков, имевших низкую чувствительность до облучения, которые увеличили чувствительность в 5...14 раз. Четкой зависимости термочувствительности от уровня воздействия облучения обнаружить не удалось.

Если в качестве сенсорного элемента датчика используют МДП-транзистор со встроенным каналом (рис. 1, б), то его ток насыщения стока при двухполюсном включении, как и в первом случае, определяется концентрацией n и подвижностью μ носителей заряда в n -канале [5]:

$$I_n = \frac{\mu C U_{з0}^2}{2l^2} = An^2\mu, \quad (4)$$

где C – емкость затвора; l – длина канала.

Однако изменение характеристик полевых МДП-транзисторов под действием облучения обусловлено в основном радиационными эффектами на границе раздела диэлектрик-полупроводник [4]. В процессе облучения в диэлектрике МДП-транзистора образуется положительный заряд, поскольку подвижность дырок оксида кремния на 9 порядков ниже подвижности электронов. Этот заряд при положительном потенциале на затворе накапливается у границы раздела диэлектрик-полупроводник, а при отрицательном – у границы диэлектрик-металл. Очевидно, что влияние накопленного положительного заряда на проводимость канала транзистора тем сильнее, чем ближе расположен заряд к поверхности полупроводника. Потенциальные ловушки для дырок находятся в основном как раз вблизи границы оксид-полупроводник, где наиболее неравновесная часть системы из-за нарушения стехиометрии. Поэтому радиационные изменения в диэлектрике оказывают более значительное влияние на проводимость канала МДП-транзистора, чем изменение концентрации типозадающей примеси N и подвижности μ носителей заряда.

Накопленный положительный заряд существенно меняет концентрацию основных носителей заряда в канале n , и проявляется в изменении порогового напряжения отсечки затвора $U_{з0}$, что приводит к изменению тока насыщения (4).

Чувствительность МДП-транзисторов к воздействию облучения возрастает с увеличением толщины металлической пленки затвора, однако не зависит от типа проводимости кремния и степени его легирования [6]. Деграция характеристик МДП-транзисторов происходит даже под действием ионизирующего излучения, энергия квантов которого недостаточна для создания структурных нарушений в объеме полупроводника. При комнатной температуре ток насыщения после облучения $I_{нф}$ практически не восстанавливается и для его восстановления необходим прогрев транзисторов при $T \geq 620$ К. В настоящее время существует несколько теорий, позволяющих объяснить большинство экспериментальных результатов по влиянию облучения на параметры МДП-транзисторов [4]. Однако, отсутствуют количественные соотношения, позволяющие оценить изменение тока насыщения в зависимости от уровня воздействующего фактора.

Для экспериментальных исследований были использованы МДП-транзисторы типа КП305. Изучалось влияние γ -квантов с энергией 5 МэВ на ток насыщения и термочувствительность. Облучение образцов проводили при комнатной температуре в

пассивном режиме. Ток насыщения измеряли при $T = 273$ К и при $T = 333$ К. На основании этих данных и определялась термочувствительность.

Результаты исследований показали, что при небольших экспозиционных дозах $D_\gamma < 10^6$ Р ток насыщения всех МДП-транзисторов возрастает (рис. 4). Воздействие большими дозами γ -квантов с $D_\gamma > 10^6$ Р оказывает различное влияние на ток I_{nD} : у транзисторов с $I_{n0} > 3$ мкА до облучения наблюдается его уменьшение (кривая 1 на рис. 4), а у транзисторов с малыми значениями I_{n0} до облучения – наблюдается его увеличение (кривая 2 на рис. 4). В результате этого ток насыщения стока МДП-транзисторов, подвергнутых воздействию больших доз γ -квантов группируется в диапазоне 17...475 мкА при $T = 273$ К, тогда как до облучения этот диапазон составлял 1...5000 мкА. Исследование стабильности облученных образцов показало, что ток I_{nD} практически не изменяется в течение нескольких месяцев. Термообработка при $T = 400$ К в течение 3-х часов также не оказывала влияния на величину тока I_{nD} .

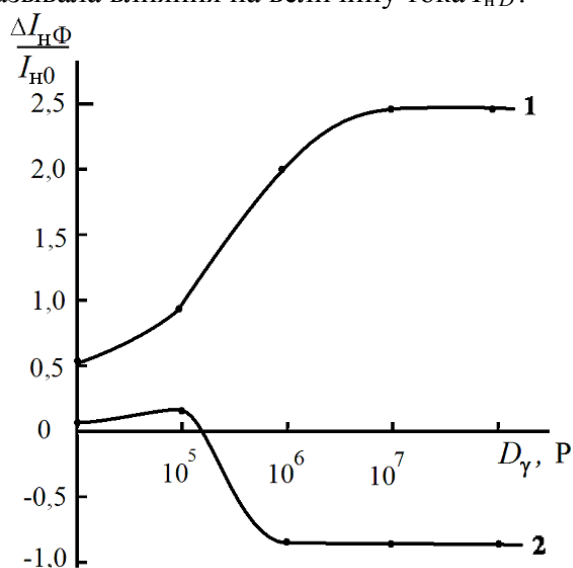


Рисунок 4 – Экспериментальные зависимости относительного изменения тока насыщения стока МДП-транзистора под воздействием потока γ -квантов

Кроме того, облучение большими дозами γ -квантов ($D_\gamma > 10^6$ Р) приводит также к усреднению значений термочувствительности. Если до облучения $I_{n0}/\Delta T$ наблюдалось в диапазоне от $-10,9$ до $+12,2$ мкА/К, то после воздействия γ -квантов с $D_\gamma > 10^6$ Р этот диапазон сузился до $2,9...10,3$ мкА/К.

Анализ приведенных результатов показывает, что γ -облучение значительными экспозиционными дозами $D_\gamma = 10^6 \dots 10^8$ Р с энергией квантов 1,25 МэВ приводит к улучшению воспроизводимости тока насыщения стока и термочувствительности полевых МДП-транзисторов. При воздействии γ -квантов дозами $D_\gamma < 10^6$ Р воспроизводимость параметров I_{nD} и $I_{n0}/\Delta T$ не улучшается.

Выводы: в данной работе показано, что уменьшение тока насыщения стока ПТ с управляющим p - n -переходом начинается при воздействии γ -квантов экспозиционной дозой $D_\gamma > 10^5$ Р энергией 1,26 МэВ, потока нейтронов $\Phi_n > 5 \cdot 10^{12}$ см⁻² энергией 1 МэВ или электронов $\Phi_e > 10^{13}$ см⁻² энергией 5 МэВ. Указанное радиационное облучение приводит не только к возрастанию термочувствительности, но и к уменьшению разброса ее значений среди различных датчиков. Увеличение концентрации примеси, задающей тип проводимости канала повышает радиационную стойкость термодатчиков на основе полевых транзисторов. Для полевых МДП-транзисторов тока насыщения стока увеличивается при воздействии γ -квантов экспозиционной дозой $D_\gamma > 10^3$ Р энергией 1,26 МэВ. Если до облучения наблюдался сильный разброс в значениях тока насыщения и термочувствительности, то после воздействия значительными экспозиционными дозами $D_\gamma = 10^6 \dots 10^8$ Р γ -облучения диапазон значений тока насыщения уменьшился в 5 раз, а термочувствительности в 3 раза.

По сравнению с биполярными транзисторами ПТ с управляющим p - n -переходом меньше подвержены влиянию радиации, поскольку их параметры не зависят от времени жизни носителей заряда. МДП-транзисторы, наоборот, больше подвержены радиационным изменениям из-за накопления положительного радиационного заряда в диэлектрике.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Викулин И.М. Датчики / [Шарапов В.М., Викулин И.М., Курмашев Ш.Д.и др.]. – К.: Брама, 2008. – 1072 с.
2. Викулин И.М. Влияние радиации на термочувствительность биполярных транзисторов / И.М. Викулин, В.Э. Горбачев, Ш.Д. Курмашев // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2015. – № 2. – С.12-19.
3. Викулин И.М. Мостовые датчики на основе полевых транзисторов / И.М. Викулин, Ш.Д. Курмашев, А.В. Веремьева // Фотоэлектроника. – 2014. – № 23. – С.135-139.
4. Вологдин Э.Н. Радиационные эффекты в некоторых классах полупроводниковых приборов / Э.Н. Вологдин, А.П. Лысенко – М.: МГИЭМ, 2001. – 70 с.
5. Викулин И.М. Физика полупроводниковых приборов / И.М. Викулин, В.И. Стафеев. – М.: Радио и связь, 1990. – 270 с.
6. Вавилов В.С. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах / В.С. Вавилов, Н.А. Ухин. – М.: Атомиздат, 2002. –168 с.

REFERENCES:

1. Vikulin I.M. *Sensors* / [Sharapov V.M., Vikulin I.M., Kurmashev S.D. at al.] – K.: Brama, 2008. – 1072 p.
2. Vikulin I.M. Influence of radiation on thermosensitivity of bipolar transistors / I.M. Vikulin V.E. Gorbachev, S.D. Kurmashev // Scientific works ONAT namedby O.S. Popov. – 2015. – № 2. – P. 12-19.
3. Vikulin I.M. Мостовые датчики на основе полевых транзисторов / I.M. Vikulin, S.D. Kurmashev, A.V. Veremjova // Photoelectronics. – 2014. – № 23. – P.135-139.
4. Vologdin E.N. Radiation effects in several classes of semiconductor devices / E.N. Vologdin, A.P. Lysenko. – M.: MGIEМ, 2001. – 70 p.
5. Vikulin I.M. Physics of semiconductor devices / I.M. Vikulin, V.I. Stafeev. – M.: Radio and communication, 2000. – 270 p.
6. Vavilov V.S. Radiation effects are in semiconductors and semiconductor devices / V.S. Vavilov, N.A. Uhin –M.: Atomizdat, 2002. –168 p.