

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ФОТОПРИЕМНЫЕ ПРИБОРЫ

Воздействие жесткого излучения (гамма-лучей, электронов высокой энергии, нейтронов, ионов) на полупроводниковые материалы вызывает квазистабильные изменения их свойств, связанные с образованием первичных радиационных дефектов-вакансий, междуузельных атомов, разупорядоченных областей, взаимодействия которых с различными несовершенствами структуры (например, растворенными примесями) приводит к формированию широкого набора активных центров.

В данной работе проведено изучение влияния облучения быстрыми электронами на два важных для фоторезисторов параметра: темновой ток и темновое сопротивление.

Измерение темнового тока и темнового сопротивления проводили без предварительного облучения фоторезистора излучением лазера ЛГ-74.

В работе учитывается, что при длительной эксплуатации материалов после облучения есть возможность появления пост-эффектов. При этом характеристики изделий будут непрерывно изменяться в течение длительного времени, вследствие чего они могут выйти за пределы допустимых значений или разрешенных отклонений. Наличие пост-эффектов затрудняет получение воспроизводимых результатов при радиационных испытаниях некоторых материалов и снижает достоверность сведений о допустимых сроках эксплуатации изготовленных из них изделий. Направление и глубина протекания процессов, обуславливающих появление пост-эффектов, зависят от природы материалов, их структуры, технологии получения. Степень их влияния на эксплуатационную надежность аппаратуры определяется ее конструктивными особенностями.

При анализе стойкости оптоэлектронных приборных структур принимались во внимание и температурные режимы. Так, радиационные дефекты, возникающие при низкотемпературном облучении в материалах охлаждаемых фотоприемников, практически полностью устраняются при повышении температуры до комнатной, а периодический нагрев в процессе эксплуатации полупроводникового материала преобразователей солнечной энергии способствует отжигу в нем радиационных дефектов.

Ключевые слова: электроны высокой энергии, оптоэлектронные приборные структуры, центры окраски, фоторезистор, защитные экраны, радиационные дефекты

Вступление. Современные оптоэлектронные приборы состоят из нескольких слоев полупроводниковых материалов различного химического состава за счет легирования атомами примеси. Кроме того, приборные структуры содержат просветляющие или защитные диэлектрические покрытия, металлические контакты, органические материалы (клеи, компаунды и т.д.). Поэтому реакция оптоэлектронных изделий на ионизирующее излучение носит более сложный характер, чем реакция отдельных материалов, входящих в их состав. Однако наибольшему влиянию ионизирующего излучения подвержены полупроводниковые материалы.

Воздействие жесткого излучения (гамма-лучей, электронов высокой энергии, нейтронов, ионов) на полупроводниковые материалы вызывает квазистабильные изменения их свойств, связанные с образованием первичных радиационных дефектов-вакансий, междуузельных атомов, разупорядоченных областей, взаимодействия которых с различными несовершенствами структуры (например, растворенными примесями) приводит к формированию широкого набора активных центров.

Критерий параметрической надежности фотоприемных устройств сформулирован, исходя из того, что рассматриваемый объект ухудшает свои параметры постепенно как при увеличении длительности воздействия, так и дозы излучения. Назначение фотоприемных устройств, накладываемые ограничения на критерий их работоспособности, а также физика

влияния радиации позволяют рассматривать фотоприемные устройства как объект, функционирующий в условиях шума. Это позволяет применить статистические методы анализа. При таком подходе мы можем использовать хорошо изученный математический аппарат проверки статистических гипотез.

Постановка задачи. Целью данной работы является исследование влияния облучения фотоприемников на основе КРТ на изменение их характеристик: пороговой чувствительности, инерционности и области спектральной чувствительности фотоприемника.

Анализ последних исследований. В последние годы определенное внимание уделялось применению в твердотельной электронике микрочастиц с высокой энергией: быстрых электронов и нейтронов, протонов, гамма-квантов. Разнообразие природы таких микрочастиц само по себе говорит о широком диапазоне возможностей управления (модификации) с их помощью параметрами изделий твердотельной электроники. Однако предубеждение, обусловленное разрушающим воздействием таких микрочастиц в условиях ядерного взрыва, опасность их потоков для операторов и связанные с этим проблемы использования генераторов – все это является факторами, сдерживающими развитие этого научно-технического направления.

Несмотря на это, выполненные в последние годы работы В.С. Вавилова, Л.С. Смирнова, Н.А. Ухина, Е.А. Ладыгина, В.И. Шаховцова, В.А. Мокрицкого, С.В. Ленкова [1,2,4] и других ученых определили возникновение нового научно-технического направления – радиационной технологии полупроводников и твердотельной электроники. К основным достижениям этого направления, по нашему мнению, следует отнести разработку и создание разнообразных генераторов микрочастиц и гамма-квантов, моделей механизмов их взаимодействия с твердым телом и управления параметрами дискретных приборов твердотельной электроники и др. Определенное внимание уделялось радиационной физике и технологии бинарных полупроводниковых соединений.

Изложение основного материала. Воздействие жесткого излучения (гамма-лучей, электронов высокой энергии, нейтронов, ионов) на полупроводниковые материалы вызывает квазистабильные изменения их свойств, связанные с образованием первичных радиационных дефектов-вакансий, междуузельных атомов, разупорядоченных областей, взаимодействия которых с различными несовершенствами структуры (например, растворенными примесями) приводит к формированию широкого набора активных центров.

Так, для твердого раствора $Cd_xHg_{1-x}Te$, наиболее вероятным результатом воздействия низкоэнергетического излучения (гамма- и электронного с энергией до 5 МэВ) при низких значениях интегральных потоков является образование пар Френкеля [5,6]. Исходная структура дефектов сразу после прекращения облучения восстанавливается за счет рекомбинации неравно-весных пар Френкеля. Скорость рекомбинации определяется коэффициентом диффузии наиболее подвижного дефекта – междуузельной ртути, который зависит от температуры и структурного совершенства.

При комнатной температуре коэффициент диффузии однократно заряженных междуузельных атомов весьма велик, скорость рекомбинации неравновесных пар Френкеля также велика, поэтому считают, что бразующаяся в данном случае структура радиационных дефектов устойчива только при относительно низких температурах. Исключение составляет облучение большими потоками при комнатной температуре, когда концентрация радиационных точечных дефектов достаточно велика для образования устойчивых комплексов. Такие изменения структуры ведут к росту концентрации электронов $n-Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$. Увеличение потока облучения и температуры приводит, по всей видимости, к росту числа пар Френкеля и образованию комплексов точечных дефектов, для рекомбинации которых необходимы более высокие температуры.

Таким образом, при воздействии на $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ (КРТ) «высокоэнергетических» частиц, помимо увеличения концентрации неравновесных пар Френкеля, возможно и одностороннее возрастание концентрации донорных дефектов и образование комплексов, могущих быть эффективными центрами рассеяния.

Основным результатом воздействия ионизирующего излучения на кристаллы КРТ является увеличение концентрации электронов, которое при низкоэнергетическом облучении происходит за счет увеличения концентрации пар Френкеля, а при высокоэнергетическом облучении – за счет появления нескомпенсированных однократно заряженных межузельных атомов ртути. В первом случае дефекты, как правило, устойчивы при относительно низких температурах и не изменяют рассеяние в исходном материале, во втором случае температурная устойчивость дефектов значительно выше. Анализ результатов облучения при комнатной температуре при высоких значениях интегральных потоков более сложен и, по-видимому, должен учитывать более сложные дефекты, чем вакансии ртути.

Обратимые изменения свойств определяются главным образом, мощностью поглощенной дозы излучения, а необратимые – величиной поглощенной дозы излучения. Обратимые изменения, как правило, являются следствием ионизации материалов и окружающей среды. Количественная оценка их может быть сделана по эффекту ионизации, который зависит от природы материала и его агрегатного состояния. Обратимые изменения могут заключаться в увеличении концентрации носителей тока, приводящему к возрастанию утечки и снижению электрического сопротивления изоляционных материалов и т.д.

Результатом такого рода изменений для фоторезисторов является уменьшение сопротивления.

При жестких ограничениях на величину допускаемых изменений параметров аппаратуры и на допустимое время их отклонения от нормальных значений (допустимое время сбоя) обратимые изменения свойств материалов в момент облучения могут играть существенную роль. Эффективность применения материалов при этом будет определяться не только величиной и характером радиационных изменений свойств, но и временем их восстановления до исходных значений после удаления из зоны облучения.

Изменение параметров полупроводниковых приборов под действием ионизирующего излучения вызвано его влиянием как на объемные, так и на поверхностные свойства полупроводников, причем изменение объемных свойств изучено значительно лучше. К основным первичным поверхностным эффектам относят:

- изменение скорости поверхностной рекомбинации носителей заряда вследствие генерации дополнительных центров рекомбинации на поверхности;
- изменение поверхностного заряда и связанное с ним изменение поверхностного потенциала вследствие либо перезарядки поверхностных центров свободными носителями, созданными излучением, либо адсорбции поверхностью полупроводника ионов газа из атмосферы в корпусе прибора, ионизированного излучением.

Появление этих эффектов весьма специфично. Так, для приборов, содержащих пассивирующие или защитные диэлектрические покрытия, влияние адсорбции ионов на параметры относительно невелико.

При длительной эксплуатации материалов после облучения следует учитывать возможность появления пост-эффектов. При этом характеристики изделий будут непрерывно изменяться в течение длительного времени, вследствие чего они могут выйти за пределы допустимых значений или разрешенных отклонений. Наличие пост-эффектов затрудняет получение воспроизводимых результатов при радиационных испытаниях некоторых материалов и снижает достоверность сведений о допустимых сроках эксплуатации изготовленных из них изделий. Направление и глубина протекания процессов, обуславливающих появление пост-эффектов, зависят от природы материалов, их структуры, технологии получения. Степень их влияния на эксплуатационную надежность аппаратуры определяется ее конструктивными особенностями.

Изменения оптических свойств могут проявляться либо косвенно, через изменение концентрации носителей, либо непосредственно через образование полос поглощения. Обычно снижение концентрации носителей увеличивает прозрачность полупроводников в области длин волн, лежащих за пределами края основного поглощения. Кроме того, в

полупроводниках полосы поглощения можно непосредственно ввести в инфракрасную область с помощью дефектов, образующихся под действием облучения. В отличие от большинства изоляторов, в которых вакансии и междоузлия, называемые центрами окраски, создают полосы поглощения в видимой области спектра [3,7,8].

Реакция электронных и оптоэлектронных изделий на ионизирующее излучение во многих случаях зависит также от их конструкции, схемы включения и режима работы. Внешние защитные экраны могут на порядок повысить радиационную стойкость аппаратуры, однако ограничения на предельные габариты и массу исключают их применение в качестве основного средства защиты [9,10,11].

При анализе стойкости оптоэлектронных приборных структур необходимо принимать во внимание и температурные режимы. Так, радиационные дефекты, возникающие при низкотемпературном облучении в материалах охлаждаемых фотоприемников, практически полностью устраняются при повышении температуры до комнатной, а периодический нагрев в процессе эксплуатации полупроводникового материала преобразователей солнечной энергии способствует отжигу в нем радиационных дефектов. Таким образом, режимы термоциклирования, которые неизбежны для некоторых типов оптоэлектронных приборов, способствуют повышению их радиационной стойкости [10,12].

В данной работе проведено изучение влияния облучения быстрыми электронами на два важных для фоторезисторов параметра: темновой ток I_T и темновое сопротивление R_T .

Измерение темнового тока и темнового сопротивления проводили без предварительного облучения фоторезистора излучением лазера ЛГ-74.

В соответствии с ГОСТ 17772-88 темновое сопротивление вычисляли по формуле:

$$R_T = \frac{U}{I_T}, \quad (1)$$

где U – напряжение питания прибора, В.

Погрешности измерений указанных параметров фоторезистора не превышали $\pm 5\%$ при доверительной вероятности $P=0,95$.

Таблица 1
Дозовая зависимость параметров фоторезисторов

Температура, К	Параметр	Доза, см ⁻²			
		10 ¹³	10 ¹⁴	10 ¹⁵	10 ¹⁶
80	R_T , Ом	71,0	27,5	20,5	22,3
	$\Delta R_T / R_{T0}$ %	- 11	- 66	- 74	- 72
	I_T , мА	0,56	1,45	1,95	1,79
	$\Delta I_T / I_{T0}$, %	12	190	290	260
120	R_T , Ом	21,0	11,2	7,5	10,4
	$\Delta R_T / R_{T0}$, %	- 16	55,2	70,0	58,4
	I_T , мА	1,9	3,6	5,3	3,9
	$\Delta I_T / I_{T0}$, %	19	123	223	160

Примечание: R_{T0} , I_{T0} – соответственно, темновое сопротивление и темновой ток необлученных фоторезисторов

Погрешности измерений указанных параметров фоторезистора не превышали $\pm 5\%$ при доверительной вероятности $P=0,95$.

Результаты измерений и расчетов представлены в таблице 1 и на рисунках 1,2.

Анализ полученных данных позволяет констатировать следующее:

– облучение электронами дозами $10^{13} - 10^{16}$ см⁻² приводит к уменьшению темнового сопротивления и увеличению темнового тока;

– относительные изменения темнового сопротивления и темнового тока больше при температуре измерения 80 К;

– для доз облучения больше 10^{15} см² относительные изменения параметров фоторезисторов отличаются незначительно.

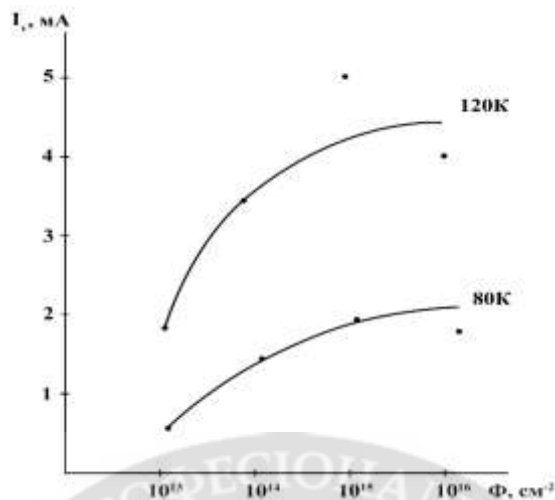


Рисунок 1 – Дозовая зависимость темнового тока фоторезистора

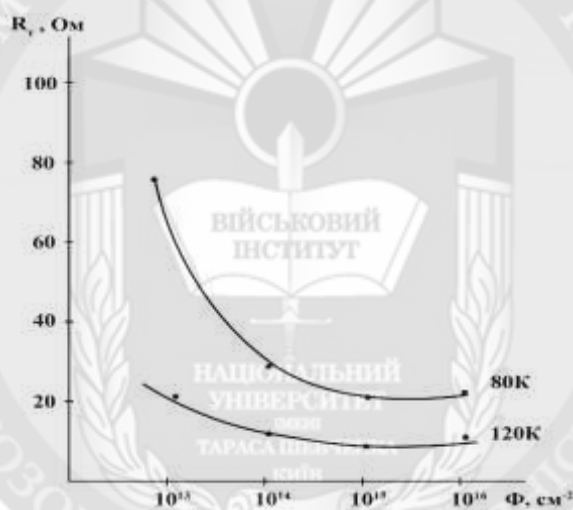


Рисунок 2 – Дозовая зависимость темнового сопротивления фоторезистора

Выводы. Изменения параметров фоторезисторов могут быть объяснены образованием в кристаллах Cd-Hg-Te радиационных дефектов донорного типа, вследствие чего концентрация свободных электронов увеличивается. Поскольку количество дефектов донорного типа предопределяется количеством вакансий ртути в междуузлиях кристаллической решетки, то становится понятным, что изменения концентрации введенных облучением носителей заряда, а следовательно, темнового сопротивления фоторезистора, ограничены по величине концентрацией вакансий ртути.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Вавилов В.С. Действие излучений на полупроводники / В.С. Вавилов, Н.П. Кекелидзе, Л.С. Смирнов. – М.: Наука, 1988. – 192 с.
2. Ленков С.В. Физико-технические основы радиационной технологии полупроводников / С.В. Ленков, В.А. Мокрицкий, Д.А. Перегудов, Г.Т. Тариелашвили. - Монография. – Одесса: Астропринт, 2002. – 297 с.
3. Гаркавенко А.С. Радиационная модификация физических свойств широкозонных полупроводников и создание на их основе лазеров большой мощности / Львов: ЗУКЦ, 2012. – 258 с.

4. Банзак О.В. Полупроводниковые детекторы нового поколения для радиационного контроля и дозиметрии ионизирующих излучений / О.В. Банзак, О.В. Маслов, В.А. Мокрицкий: Под ред. В.А. Мокрицкого, О.В. Маслова. – Монография. – Одесса, 2013. – Изд-во «ВМВ». – 220 с.
5. Bouchet J.M. PWR primary flow measurements by correlation analysis of nitrogen-16 fluctuations / J.M. Bouchet, et al. – Progress in Nuclear Energy. – 1982. – Vol. 9.
6. Awadalla S.A. Characterization of detector-grade CdZnTe crystals grown by traveling heater method (THM) / S.A. Awadalla, J. Mackenzie, H. Chen, eds. // Journal of Crystal Growth. – Vol. 312, issue 4. – 2010. – 507-513c.
7. Grybos P. Front-end Electronics for Multichannel Semiconductor Detector Systems; EuCARD Editorial Series on Accelerator Science and Technology, Vol.08 / Institute of Electronic Systems Warsaw University of Technology . – Warsaw: 2010. – 201 p.
8. Dumitrescu A. Comparison of a digital and an analogical gamma spectrometer at low count rates / A. Dumitrescu // U.P.B. Sci. Bull., Series A. – Vol. 73. – Iss. 4, 2011. – P. 127-138.
9. Maslov O. Passive Computer Gamma- Tomography of Nuclear Fuel / O. Maslov, V. Mokritsky, O. Banzak, // ANIMMA. Third International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications – Marseille, June 23-27, 2013. – Book of Abstracts – P. 51.
10. Maslov O.V. The Improved CdZnTe Dose Rate Probe / O.V. Maslov, M.V. Maksimov, L.L. Kalnev // 2008 IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and 16th Room Temperature Semiconductor Detector Workshop – Dresden: 19–25 Oct. 2008. – P. 12-87.
11. Masuruk K. Dopant incorporation during liquid phase epitaxy / K. Masuruk, T.Bryskewicz // J. Appl. Phys., 1981. – V. 52. – N3. – part 1. – P. 1347–1350.
12. Maslov O. Multiple energies passive computer tomography of nuclear fuel / O. Maslov // Proceedings of the International Ukrainian-Japanese Conference on Scientific and Industrial Cooperation – Odesa 24 – 25 October 2013. – P. 114-116.

REFERENCES:

1. Vavilov V.S. (1988) «Deystviye izlucheniya na poluprovodniki» [Effect of radiation on semiconductors] / V.S. Vavilov, N.P. Kekelidze, L.S. Smirnov. – M.: Science, 1988. – 192 p.p.
2. Lenkov S.V. (2002) «Fiziko-tekhnicheskiye osnovy radiatsionnoy tekhnologii poluprovodnikov» [Physical and technical basis of radiation technology of semiconductors] / S.V. Lenkov, V.A. Mokritskiy, D.A. Peregudov, G.T. Tariyelashvili. - Monograph. - Odessa: Astroprint, 2002. - 297 p.
3. Garkavenko A.C. (2012) «Radiatsionnaya modifikatsiya fizicheskikh svoystv shirokazonnykh poluprovodnikov i sozdaniye na ikh osnovе laserov bol'shoy moshchnosti» [Radiation modification of the physical properties of wide-gap semiconductors and creation of high-power lasers on their basis] / Lviv: ZUKTS, 2012. - 258 p.
4. Banzak O.V. (2013) «Poluprovodnikovyye detektory novogo pokoleniya dlya radiatsionnogo kontrolya i dozimetrii ioniziruyushchikh izlucheniya» [Semiconductor detectors of a new generation for radiation monitoring and dosimetry of ionizing radiation] / O.V. Banzak, O.V. Maslov, V.A. Mokritskiy: Pod red. V.A. Mokritskogo, O.V. Maslova. – Monograph. - Odessa, 2013. - Publishing House "WWII". - 220 s.
5. Bouchet J.M. PWR primary flow measurements by correlation analysis of nitrogen-16 fluctuations / J.M. Bouchet, et al. – Progress in Nuclear Energy. – 1982. – Vol. 9.
6. Awadalla S.A. Characterization of detector-grade CdZnTe crystals grown by traveling heater method (THM) / S.A. Awadalla, J. Mackenzie, H. Chen, eds. // Journal of Crystal Growth. – Vol. 312, issue 4. – 2010. – 507-513c.
7. Grybos P. Front-end Electronics for Multichannel Semiconductor Detector Systems; EuCARD Editorial Series on Accelerator Science and Technology, Vol.08 / Institute of Electronic Systems Warsaw University of Technology . – Warsaw: 2010. – 201 p.
8. Dumitrescu A. Comparison of a digital and an analogical gamma spectrometer at low count rates / A. Dumitrescu // U.P.B. Sci. Bull., Series A. – Vol. 73. – Iss. 4, 2011. – P. 127-138.
9. Maslov O. Passive Computer Gamma- Tomography of Nuclear Fuel / O. Maslov, V. Mokritsky, O. Banzak, // ANIMMA. Third International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications – Marseille, June 23-27, 2013. – Book of Abstracts – P. 51.
10. Maslov O.V. The Improved CdZnTe Dose Rate Probe / O.V. Maslov, M.V. Maksimov, L.L. Kalnev // 2008 IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and 16th Room Temperature Semiconductor Detector Workshop – Dresden: 19–25 Oct. 2008. – P. 12-87.
11. Masuruk K. Dopant incorporation during liquid phase epitaxy / K. Masuruk, T.Bryskewicz // J. Appl. Phys., 1981. – V. 52. – N3. – part 1. – P. 1347–1350.

д.т.н., проф. Мокрицький В.А., д.т.н., доц. Маслов О.В., д.т.н., доц. Банзак О.В.
**АНАЛІЗ ВПЛИВУ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ НА ФОТОПРИЙМАЛЬНИЙ
ПРИЛАДИ**

Вплив жорсткого випромінювання (гамма-променів, електронів високої енергії, нейтронів, іонів) на напівпровідникові матеріали викликає квазістабільні зміни їх властивостей, пов'язані з утворенням первинних радіаційних дефектів-вакансій, междуузельних атомів, розупорядкованих областей, взаємодії яких з різних недосконалостями структури (наприклад, розчиненими домішками) призводить до формування широкого набору активних центрів. У даній роботі проведено вивчення впливу опромінення швидкими електронами на два важливих для фоторезисторів параметра: темного ток і темної опір. Вимірювання темного струму і темного опору проводили без попереднього опромінення фоторезистора випромінюванням лазера ЛГ-74. В роботі враховується, що при тривалій експлуатації матеріалів після опромінення є можливість появи пост-ефектів. При цьому характеристики виробів будуть безупинно змінюватися протягом тривалого часу, внаслідок чого вони можуть вийти за межі допустимих значень або дозволених відхилень. Наявність пост-ефектів ускладнює отримання відтворюваних результатів при радіаційних випробуваннях деяких матеріалів і знижує вірогідність відомостей про допустимі терміни експлуатації виготовлених з них виробів. Напрямок та глибина протікання процесів, які обумовлюють появу пост-ефектів, залежать від природи матеріалів, їх структури, технології отримання. Ступінь їх впливу на експлуатаційну надійність апаратури визначається її конструкційними особливостями. При аналізі стійкості оптоелектронних приладових структур бралися до уваги і температурні режими. Так, радіаційні дефекти, що виникають при низькотемпературному опроміненні в матеріалах охолоджуваних фотоприймачів, практично повністю усуваються при підвищенні температури до кімнатної, а періодичний нагрів в процесі експлуатації напівпровідникового матеріалу перетворювачів сонячної енергії сприяє відпаду в ньому радіаційних дефектів.

Ключові слова: електрони високої енергії, оптоелектронні приладові структури, центри забарвлення, фоторезистор, захисні екрани, радіаційні дефекти

Dr. Sci. Tech., prof. Mokritskij V.A., Dr. Sci. Tech. Maslov O.V., Dr. Sci. Tech. Banzak O.V.
ANALYSIS OF THE EFFECT OF IONIZING RADIATIONS ON PHOTOPARTOR DEVICES

The impact of hard radiation (gamma rays, high-energy electrons, neutrons, ions) on semiconductor materials causes quasi-stable changes in their properties associated with the formation of primary radiation defects-vacancies, interstitial atoms, disordered regions, whose interactions with various imperfections of the structure (for example, dissolved impurities) leads to the formation of a wide range of active centers. In this paper, we studied the effect of irradiation with fast electrons on two parameters important for photoresistors: dark current and dark resistance. The dark current and dark resistance were measured without prior irradiation of the photoresistor by LG-74 laser radiation. The paper takes into account that after prolonged use of materials after irradiation there is the possibility of post-effects. At the same time, the characteristics of the products will continuously change over a long period of time, as a result of which they may go beyond the allowable values or allowed deviations. The presence of post-effects makes it difficult to obtain reproducible results from radiation tests of some materials and reduces the reliability of information about the permissible service life of products made from them. The direction and depth of the processes that cause the appearance of post-effects depend on the nature of materials, their structure, technology of production. The degree of their influence on the operational reliability of the equipment is determined by its structural features. When analyzing the durability of optoelectronic device structures, temperature regimes were also taken into account. Thus, radiation defects arising during low-temperature irradiation in materials of cooled photodetectors are almost completely eliminated when the temperature rises to room temperature, and periodic heating during operation of the semiconductor material of solar energy converters contributes to annealing of radiation defects in it.

Key words: high energy electrons, optoelectronic device structures, color centers, photoresistor, protective screens, radiation defects.