

Д. А. ЕГОРОВ, А. В. РУПАСОВ, А.А. УНТИЛОВ

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ И ПУТИ ЕЕ ПОВЫШЕНИЯ (ОБЗОР)

Рассматривается вопрос обеспечения радиационной стойкости волоконно-оптических гироскопов и их основных компонентов (волоконных световодов, элементов интегральной оптики, источников оптического излучения, электронных компонентов и оптических материалов) по материалам отечественных и зарубежных публикаций. Анализируются возможные пути повышения радиационной стойкости.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, радиационная стойкость.

Введение

Обеспечение работоспособности в условиях воздействия ионизирующих излучений является достаточно серьезной проблемой для волоконно-оптических датчиков, в том числе волоконно-оптических гироскопов (ВОГ), предназначенных для использования в условиях космического полета, в различных системах управления в непосредственной близости от ядерных реакторов атомных электростанций и энергетических установок подвижных объектов, военных системах [1].

Ионизирующее излучение (ИИ), или радиация, – это поток заряженных или нейтральных частиц и квантов электромагнитного излучения, прохождение которых через вещество приводит к ионизации и возбуждению атомов или молекул среды. По своей природе оно делится на фотонное (гамма-излучение, рентгеновское излучение) и корпускулярное (альфа-излучение, электронное, протонное, нейтронное) [2].

Радиационная стойкость ВОГ и систем на их основе должна быть достаточной для сохранения надежного функционирования и основных рабочих характеристик изделий при возможном воздействии соответствующих доз ИИ. Она определяется радиационной стойкостью выбранных компонентов и материалов, в том числе и кварцевого оптоволокна. Кварцевые волокна обладают рядом уникальных свойств, благоприятных для применения в сложных внешних условиях, однако они весьма чувствительны к ИИ. Чувствительны к ИИ и другие составные части ВОГ, такие как интегральные оптические схемы, источники оптического излучения, фотоприемники, электронные компоненты, полимерные материалы, используемые при изготовлении ВОГ.

В целом радиационная стойкость приборов, компонентов, материалов – это их способность сохранять свои рабочие характеристики и свойства (механические, электрические, оптические и др.) при воздействии ИИ [2].

Егоров Дмитрий Александрович. Ведущий инженер, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

Рупасов Андрей Викторович. Кандидат технических наук, начальник группы, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Унтилов Александр Алексеевич. Кандидат технических наук, начальник лаборатории, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Основные параметры, по которым оценивают радиационную стойкость оптоэлектронных узлов ВОГ, – это потери оптической мощности, изменение поляризационных свойств и спектра оптического излучения. Изменение оптических параметров в оптоволокне может негативно повлиять на характеристики ВОГ. Например, возрастание оптических потерь, так же как и снижение выходной оптической мощности источника оптического излучения, приводит к снижению приходящей на фотоприемник оптической мощности и уменьшению отношения «сигнал/шум» ВОГ, следствием чего является увеличение случайной составляющей выходного сигнала ВОГ, обратно пропорциональной квадратному корню из оптической мощности. Нестабильность спектра оптического излучения источника влияет на масштабный коэффициент ВОГ [3].

В настоящем обзоре рассмотрены характеристики ИИ, наиболее опасных для ВОГ, проведен анализ и представлены обобщенные данные по воздействию ИИ на такие компоненты ВОГ, как волоконные световоды, многофункциональные интегральные оптические схемы, источники оптического излучения, фотоприемники, отдельные электронные компоненты, полимерные материалы (клеи, компаунды, герметики), а также рассматриваются факторы радиационной стойкости и перспективы ее повышения у волоконно-оптических компонентов и материалов.

Характеристика ионизирующих излучений, наиболее опасных для ВОГ

ИИ обладает способностью ионизировать среду и тем самым создавать радиационные дефекты в различных материалах, включая компоненты ВОГ. Среди различных видов ИИ наибольшую опасность для волоконно-оптических датчиков, в том числе для ВОГ, представляют нейтронное и гамма-излучение, а также протонное и рентгеновское. Воздействие нейтронов и протонов на компоненты ВОГ характеризуется поглощенной дозой и общим числом частиц, прошедших через поверхность образца за время эксперимента (интегральным потоком, который можно также пересчитать в поглощенную дозу) [1]. Дальность распространения и проникающая способность альфа- и бета-частиц (электронов) сравнительно невелики, и их воздействие на компоненты ВОГ далее рассматриваться не будет.

При небольших потоках и дозах до 1-10 кГр (1 Гр = 1 Дж/кг = 100 рад) действие на волоконные световоды и другие компоненты ВОГ протонов, нейтронов, рентгеновского излучения приблизительно эквивалентно действию гамма-излучения с той же поглощенной дозой [1, 4]. В связи с этим далее будет рассматриваться воздействие гамма-излучения при уровнях поглощенной дозы до 10 кГр за исключением отдельно оговариваемых случаев.

Радиационные условия, в которых могут находиться ВОГ, включают естественную и искусственную радиацию. Как правило, естественная радиация на Земле невелика – около 1,5 мГр/год, поток частиц космической радиации тоже низкий. Высокие дозы радиации создают искусственные источники гамма-излучения и нейтронов, такие как ядерные взрывы, ядерные и термоядерные реакторы. Что касается радиационной обстановки в космосе, то при естественных радиационных условиях наблюдаются потоки ионизирующих частиц из околоземного радиационного пояса (в основном электронов и протонов), гамма- и рентгеновское излучение. Системы для орбитальных космических аппаратов для использования в естественных радиационных условиях выполняются с радиационной стойкостью 10 кГр в течение 5 лет. Для межпланетных космиче-

ских полетов суммарная поглощенная доза радиации в течение 12 лет может составить 100 кГр. Даже при условии применения алюминиевого экрана толщиной в 10 мм на геостационарной орбите типичная поглощенная доза для спутниковых систем составляет около 137 Гр за 20 лет работы (6,85 Гр/год), а для низких околоземных орбит суммарная поглощенная доза за 20-летний период составляет около 66 Гр (3,28 Гр/год) [1, 13].

Радиационная стойкость волоконных световодов и пути ее повышения

Чувствительным элементом ВОГ является катушка оптоволокна (волоконного световода, ВС) длиной от нескольких сотен метров до нескольких километров. Кроме того, в ВОГ используются волоконно-оптические разветвители, поляризаторы и активные оптические волокна (в составе источника оптического излучения), которые также подвержены воздействию ИИ.

Реакция ВС на облучение с физической точки зрения сводится к трем основным явлениям: оптическому затуханию, люминесценции и механическим повреждениям.

Наведенное оптическое затухание является результатом ионизации вещества волокна. Под действием ИИ разрушаются электронно-химические связи, образующие матрицу стекла, создаются новые уровни энергии электронов и между ними становятся возможными электронные переходы, многие из которых создают дополнительные полосы поглощения или излучения в соответствующих областях спектра. Для объяснения физической сути наведенного затухания в кварцевом стекле широко используется электронно-дырочная модель образования центров окраски в оптической структуре стекла под действием радиации. В соответствии с этой моделью в кварцевом стекле, основой которого является окись кремния, регулярной и самой сильной является связь Si–O₂ в кварцевом тетраэдре, где каждый атом прочно связан с четырьмя атомами кислорода. Дефектом кварцевого стекла считается любое существенное искажение регулярности сетки [5].

Необходимо отметить, что в световоде под действием радиации наряду с наведенным затуханием возникает и люминесценция, являющаяся процессом, обратным наведенному затуханию, и обусловленная электронно-дырочной рекомбинацией и другими процессами [5]. При этом временная зависимость максимума затухания определяется не поглощенной дозой, а ее мощностью (то есть поглощенной дозой за единицу времени). В данной работе эффект люминесценции не рассматривается, так как вклад его по сравнению с наведенным затуханием незначителен.

Механические свойства ВС изменяются в основном при воздействии быстрых и тепловых нейтронов. Они способны привести к изменению фазового состояния и плотности стекла, образованию точечных и объемных дефектов, вызывающих образование внутренних напряжений и деформаций, и к изменению геометрических размеров сердцевины ВС. Кроме того, под действием потока нейтронов на границе сердцевины и оболочки может происходить образование дефектов и изменение свойств отражающей оболочки.

Основной эффект радиационного воздействия на ВС – это наведенное оптическое затухание. При радиационном воздействии на ВС волокно «темнеет», и в нем увеличивается коэффициент затухания оптического сигнала, которое на первоначальном этапе развития волоконной оптики было чрезвычайно большим – достигало нескольких тысяч децибел на километр при дозах облучения до 100 Гр [1].

Благодаря целенаправленным исследованиям положение с радиационной стойкостью кварцевых волокон существенно изменилось в лучшую сторону, но проблема полностью еще не решена.

Под действием ИИ в сетке кварцевого стекла ВС возникают точечные дефекты (радиационные центры окраски, РЦО), поглощающие оптическое излучение, распространяющееся в ВС. В результате в ВС возникают радиационно наведенные потери (РНП) света, приводящие к ошибкам в работе датчика вплоть до полной утраты им работоспособности. Обеспечить радиационную стойкость ВС означает минимизировать РНП до приемлемого уровня (единицы децибел на километр) [6]. РНП – это один из главных параметров, характеризующих степень воздействия ионизирующего излучения на ВС. Они определяются следующими факторами: условиями облучения, составом материала и конструкцией ВС.

Наиболее важным параметром, характеризующим условия облучения (вид излучения, характер излучения, мощность дозы, доза) и влияющим на РНП ВС, является доза облучения. При этом характер дозовой зависимости наведенного поглощения в первую очередь определяется материалом сердцевины и оболочки световода. К настоящему времени эти зависимости для различных типов ВС изучены до значений порядка 10^7 Гр [5].

Значительное влияние на радиационную стойкость ВС (здесь и далее под радиационной стойкостью будет подразумеваться величина РНП) оказывает его химический состав. Основными примесями, вводимыми в кварцевые ВС, являются германий и фосфор, повышающие показатель преломления, а также бор и фтор, понижающие его. Именно эти примеси используются для получения требуемых свойств волокна как волноводной структуры [1].

Величина РНП в ВС зависит и от таких геометрических параметров ВС, как диаметр сердцевины, профиль показателя преломления, толщина оболочки, вид защитного покрытия. Так, кварц-полимерные волокна с диаметром сердцевины 200 мкм в два-три раза более устойчивы к радиации по величине РНП, чем волокна с диаметром сердцевины 125 мкм. Вклад в общий уровень РНП вносит и оболочка волокна: «сухие» кварц-полимерные световоды с тонкими оболочками менее чувствительны к облучению и восстанавливаются лучше (более быстрая релаксации РНП после прекращения действия ИИ), чем световоды аналогичного состава, но с более толстыми оболочками. Однако существует предельная толщина оболочки, после которой РНП начинают расти. Волокна со ступенчатым профилем показателя преломления более стойки к воздействию излучения, чем волокна с градиентным профилем.

Существенное влияние на радиационную стойкость ВС оказывает технология их изготовления: производство заготовки и вытягивание из нее волокна. В части производства заготовок существенное влияние оказывает парциальное давление газов, участвующих в реакции (кислород, хлор и др.). В процессе вытягивания из заготовки волокна в нем возникают деформации и дефекты, нарушаются межатомные связи, идентичные образующимся под воздействием ионизирующего излучения, поэтому радиационная стойкость исходного материала не дает гарантии получения радиационно стойкого световода. Следует отметить, что эффекты в ВС, вызванные воздействием радиации, изучены не до конца. К настоящему времени известны неполные модели радиационных процессов в ВС и их приблизительная физическая интерпретация.

Создание надежных волоконно-оптических систем (в том числе на базе ВОГ) для работы в условиях ИИ ставит задачу выбора оптимальной технологии, химиче-

ского состава, структуры и профиля показателя преломления световода для обеспечения высокой радиационной стойкости. Для некоторых применений стандартные одномодовые световоды из германосиликатного стекла непригодны из-за больших РНП, поэтому требуется разработка специальных радиационно стойких ВС. Альтернативой германосиликатным световодам могут быть световоды с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и фторсиликатной светоотражающей оболочкой или световоды из кварцевого стекла, легированного азотом [3].

Влияние радиации на механические свойства ВС можно ослабить, изменив состав и число защитных покрытий, например, применением промежуточного спецлака AD или нанесением поверх оболочки покрытия из полимера [7]. Для повышения радиационной стойкости германий и другие легирующие добавки, кроме фтора, должны быть исключены из химического состава световодов. ВС с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и со светоотражающей оболочкой из фторсиликатного стекла были разработаны за рубежом [8] и в России [9]. Такие световоды имеют более высокую радиационную стойкость, чем стандартные ВС, содержащие германий. Позднее было установлено, что небольшая добавка фтора в сердцевину позволяет несколько повысить радиационную стойкость ВС [10].

В работе [10] были исследованы спектры РНП в MCVD-световодах со фторсиликатной оболочкой и сердцевиной из фторсиликатного и нелегированного кварцевого стекла, полученных при различных режимах MCVD-процесса. Исследование проводилось в спектральном интервале 1,1-1,7 мкм в процессе гамма-облучения до дозы 8,1 кГр (мощность дозы 0,75 Гр/с). В результате удалось выявить технологические факторы, влияющие на РНП. Оказалось, что РНП зависят не только от режимов синтеза сердцевины, но не в меньшей степени и от режимов синтеза фторсиликатной светоотражающей оболочки. По результатам исследования технологические режимы были оптимизированы (пока не в полной мере), что позволило снизить величину РНП в световодах с нелегированной сердцевиной примерно в 5 раз (до 2 дБ/км) при мощности дозы 0,75 Гр/с.

Зависимость РНП от дозы в процессе гамма-облучения в двух ВС российской разработки (Научный центр волоконной оптики (НЦВО) РАН, Москва) с наибольшей радиационной стойкостью, достигнутой на момент написания работы [10], приведена на рис. 1 в сравнении с РНП в радиационно стойких ВС ведущих зарубежных фирм, кривые для которых взяты из литературы.

При дозе ~8 кГр РНП в ВС на рис. 1 лежат в интервале ~2–25 дБ/км. РНП в ВС, описанных в [10], составляют ~10 дБ/км, то есть приходится примерно на середину этого интервала. При дозах больше ~1 кГр российские ВС 1 и 2 показали меньшие РНП, чем зарубежный радиационно стойкий ВС 3, изготовленный, по-видимому, также по технологии MCVD, и меньшие, чем ВС 4, изготовленный по технологии PCVD.

РНП в радиационно стойких ВС, серийно выпускае-

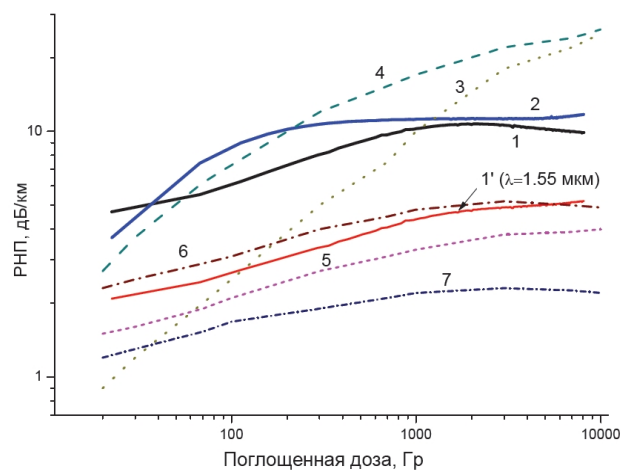


Рис. 1. РНП в световодах российской разработки (1, 2) и в световодах ведущих зарубежных производителей (3–7) [10]

мых фирмой Fujikura, варьируются от световода к световоду, при этом кривая для ВС 6 соответствует наибольшему возможному РНП, а для ВС 7 – наименьшему (мощность дозы 1,6 Гр/с, данные взяты из [10]). При дозе ~8 кГр РНП в ВС 1 и 2, описанных в [10], всего в 2 раза выше, чем в ВС 6. При этом РНП на $\lambda = 1,55$ мкм в ВС 1 (кривая 1' на рис. 1) даже несколько ниже, чем у ВС 6 на $\lambda = 1,31$ мкм.

Экспериментально установлено [11], что применительно к радиационно-стойким ВС с сердцевинной из легированного фтором кварцевого стекла снижение натяжения вытяжки 0,6...0,1 Н уменьшало РНП приблизительно в 3 раза, а уменьшение скорости вытяжки с 120 до 10 м/мин – в 2 раза (длина волны $\lambda = 1,31$ мкм, абсолютные величины РНП в публикации не приводятся). Было установлено, что РНП сильно зависят от режимов вытяжки, поэтому при изготовлении радиационно-стойких ВС необходимо существенно снижать значение этих параметров по сравнению со значениями, обычно используемыми для других типов ВС. Кроме того, специалистами НЦВО РАН совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана, НОЦ «Фотоника и ИК-техника» (Москва), Институтом химии высокочистых веществ РАН им. Г.Г. Девятовых (Нижний Новгород) было установлено, что метод создания избытка кислорода в сердцевине для повышения радиационной стойкости перспективнее метода фторирования, тем более что добавка фтора в сердцевину ухудшает волноводные свойства ВС при наличии внешней оболочки, образованной материалом опорной трубы [6].

В работе [6] приводится сравнение радиационно-стойких одномодовых волоконных световодов собственной разработки с зарубежными волокнами фирмы J-Fiber (Германия). В ходе эксперимента волокна были облучены один за другим от источника γ -излучения ^{60}Co при мощности дозы 7,6 Гр/с и комнатной температуре в течение 59...61 мин, общая доза облучения составляла 27...28 кГр. В процессе облучения и в течение 15 мин после завершения облучения измерялись РНП при $\lambda = 1,31$ и 1,55 мкм – наиболее актуальных длинах волн для практических применений. Эволюция РНП во времени для исследованных ВС при $\lambda = 1,31$ и 1,55 мкм приведена на рис. 2. При этом разность РНП в российских ВС и ВС фирмы J-Fiber возрастает с дозой облучения: при дозе 27 кГр (через 59 мин облучения) РНП в российских ВС приблизительно в 3-8 раз меньше при длине волны $\lambda = 1,31$ мкм и в 3-6 раз меньше при длине волны $\lambda = 1,55$ мкм.

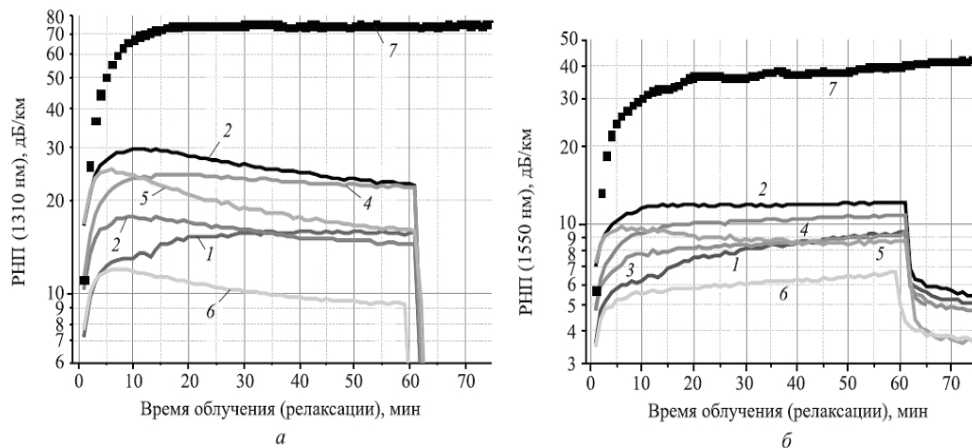


Рис. 2. Эволюция РНП в волоконных световодах российской разработки (НЦВО РАН) – образцы (1), (2), (3), (4), (5), (6) – в процессе их гамма-облучения в течение 59...61 мин и последующей релаксации в течение 15 мин (мощность дозы – 7,6 Гр/с) и в радиационно-стойком ВС MIL-PRF-49291/7-01 фирмы J-Fiber – образец (7), который непрерывно облучали 75 мин при длине волны $\lambda = 1,31$ (а) и 1,55 мкм (б) [6]

Компания Nufern производит как стандартное одномодовое волокно типа SMF-28, так и SMF-волокно с повышенной устойчивостью к ИИ [12], в том числе S1550-HTA – одномодовое волокно с кварцевой сердцевиной, радиационно устойчивое, и R1310-HTA – тоже одномодовое волокно, оптически и механически схожее с SMF-28, но имеющее большую устойчивость к воздействию ИИ по сравнению с ним. Графики зависимости РНП от поглощенной дозы облучения на длине волны 1,55 мкм представлены на рис. 3.

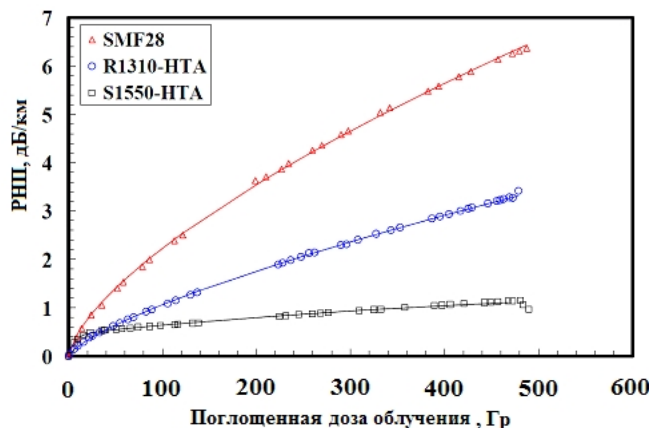


Рис. 3. Графики зависимости РНП от поглощенной дозы облучения для трех типов оптического волокна [12]

Для анизотропного оптического волокна (PMF) РНП существенно выше, чем для изотропного одномодового волокна (типа SMF-28). Компания FiberCore разработала и производит анизотропные ВС с сохранением поляризации и высоким двулучепреломлением, устойчивые к ИИ [13]. В табл. 1 приведены результаты испытаний на РНП радиационно стойких ВС при их облучении с поглощенной дозой 200, 1000 и 2000 Гр.

Таблица 1

Результаты измерения РНП трех радиационно стойких типов волокна с различной мощностью дозы (накопленной дозы за единицу времени) и различной суммарной поглощенной дозой

Тип волокна	Суммарная поглощенная доза (Гр)	200	1000	2000	5000
	Мощность дозы (Гр/ч)	50	250	500	250
	РНП на длине волны 1,55 мкм	дБ/км	дБ/км	дБ/км	дБ/км
НВ1500G/033		1,55	2,85	6,89	–
НВ1500G-RT		0,62	2,00	3,46	6,84
НВ1500G/SB-001		0,33	3,52	5,23	–

В табл. 2 для сравнения приведены результаты испытаний обычного двулучепреломляющего ВС (не радиационно стойкого).

Из табл. 1 и 2 видно, что в радиационно стойких ВС РНП примерно на 2 порядка меньше, чем в стандартном двулучепреломляющем ВС с сохранением поляризации (PMF-волокне).

Результаты измерения РНП двулучепреломляющего оптоволокна

Тип волокна	Суммарная поглощенная доза (Гр)	200
	Мощность дозы (Гр/ч)	50
	Средние РНП на длине волны 1,55 мкм	дБ/км
НВ1500G		58,3
НВ1500G-Н1		71,0

Таким образом, для ВС решением проблемы недостаточной радиационной стойкости (больших величин РНП) может быть применение кварцевого стекла, легированного азотом, вместо германо-силикатного стекла, а также изготовление световодов с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и фторсиликатной светоотражающей оболочкой. Для повышения радиационной стойкости германий и другие легирующие добавки, кроме фтора, должны быть исключены из химического состава ВС. Это позволит снизить РНП примерно в 5 раз (с ~ 10 до ~ 2 дБ/км) [10]. Для повышения механической устойчивости ВС к ИИ варьируют состав и число защитных покрытий ВС, например включают в состав световода промежуточный специальный лак или наносят поверх оболочки покрытия из полимера [7].

Радиационная стойкость многофункциональных интегральных оптических схем (МИОС) на основе кристалла ниобата лития

В связи с широким применением в ВОГ сегнетоэлектрического кристалла ниобата лития (LiNbO_3) в качестве основы для МИОС актуальной задачей становится изучение влияния воздействия ИИ на кристаллы ниобата лития (далее – НЛ) различного химического состава. Облучение кристалла НЛ частицами и фотонами высоких энергий вызывает появление точечных и электронных дефектов. В частности, гамма-излучение может привести к окрашиванию кристаллов, увеличению фоторефракции и значительному изменению оптического поглощения.

Легирование кристаллов может существенно изменять их оптические свойства, например чувствительность к повреждению не только лазерным излучением, но и ИИ [14]. Исследование спектров оптического пропускания необлученных и облученных различными дозами гамма-излучения кристаллов позволило установить особенности оптического пропускания НЛ в зависимости от концентрации, типа легирующей добавки и дозы ИИ. Изменение оптического пропускания легированных кристаллов LiNbO_3 при гамма-облучении существенно зависит как от типа легирующей добавки, так и от ее концентрации. При этом радиационная стойкость легированных кристаллов может быть и существенно выше и существенно ниже, чем у номинально чистых кристаллов LiNbO_3 [14].

Наибольшую радиационную стойкость (из исследованных в [14] образцов) показали кристаллы $\text{LiNbO}_3:\text{Gd}$ (0,26 масс. %), $\text{LiNbO}_3:\text{Gd}$ (0,43 масс. %) и $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$ (0,27 масс. %), в которых под воздействием гамма-облучения (доза $\sim 5 \cdot 10^4$ кГр) оптическое пропускание практически не изменяется ($\leq 2\%$).

Известен ряд работ [15–20], посвященных исследованию механизма воздействия ИИ на характеристики интегрально-оптических схем на базе протонно-обменных волноводов в ниобате лития, в которых говорится о том, что параметры исследуемых устройств остаются стабильными при ионизирующем воздействии.

Согласно работе [21], влияние ИИ в космосе на МИОС заключается в ионизирующем и смещающем эффектах, каждый из которых проявляет кумулятивные свойства. Ионизирующий эффект заключается в том, что дефекты в структуре кристалла НЛ улавливают заряженные частицы, формируют области с измененной электронной конфигурацией и поглощают подающий на них свет с определенной длиной волны, образуя «центры окраски», что влечет за собой изменение оптических свойств волноводов в МИОС.

Смещающий эффект, как правило, вызывается излучением протонов и нейтронов, тяжелых ионов и других частиц. Под действием протонного излучения разрушается кристаллическая решетка материала волновода, что приводит к изменению его показателя преломления.

По информации, приведенной в [21], можно сделать вывод о том, что такие параметры МИОС, как коэффициент деления разветвителя, избыточные потери, полуволновое напряжение фазового модулятора и коэффициент перекрестного преобразования поляризации изменяются при воздействии гамма-излучения ^{60}Co (общая доза до ~ 5 кГр) не более чем на единицы процентов. При этом отмечается, что в течение трех следующих лет параметры МИОС остаются неизменными. Аналогичные данные получены при воздействии на МИОС протонным излучением (исследовались два режима, в первом из них энергия протонов составила 5 МэВ, скорость потока $- 2,08 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, общий поток $- 2,8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$; во втором – энергия протонов составила 350 кэВ, скорость потока $- 3,2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, общий поток $- 1,2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) и нейтронным излучением (скорость потока $- 4,46 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, общий поток $- 1,56 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$).

Стоит отметить, что в подавляющем большинстве случаев в ВОГ применяется МИОС с Y-разветвителем, выполненном в кристалле LiNbO_3 по протонообменной технологии, но в некоторых случаях применяются МИОС с X-разветвителем и волноводами, изготовленными по технологии диффузии титана [22, 23], которые гораздо реже освещаются в научно-исследовательской литературе. Воздействие ИИ на МИОС подобного типа до настоящего времени практически не изучено и требует дальнейшего исследования, публикаций по этому вопросу в открытой печати на данный момент не найдено.

Радиационная стойкость источников оптического излучения, применяемых в ВОГ

В качестве источников оптического излучения в ВОГ чаще всего используются эрбиевые волоконные суперлюминесцентные источники (ЭВСИ), содержащие активные ВС, легированные эрбием. Принцип действия ЭВСИ заключается в том, что излучение накачки на длине волны 0,98 и 1,48 мкм вызывает инверсию населенности в активном ВС. При этом возникает явление усиленного спонтанного излучения, обусловленное схемой энергетических уровней эрбия.

Проведенные исследования показали, что под воздействием ИИ в ЭВСИ снижается оптическая мощность и смещается центральная длина волны выходного излучения [24]. Снижение выходной оптической мощности напрямую влияет на фотонный шум, от которого зависит случайная составляющая выходного

сигнала ВОГ. Выражение для случайной составляющей сигнала ВОГ (ARW) выглядит следующим образом [25]:

$$ARW = \frac{\sqrt{2\lambda c} \sqrt{\cos^2(\varphi_b/2)}}{2\pi LD \cdot \sin(\varphi_b)} \cdot \sqrt{\frac{2e}{RP}}, \quad (1)$$

где e – заряд электрона, φ_b – фазовый сдвиг ВОГ, R – коэффициент чувствительности фотоприемника, P – мощность, регистрируемая фотоприемником, L и D – длина и диаметр волоконной катушки (чувствительного элемента ВОГ) соответственно, c – скорость света в вакууме, λ – средняя длина волны оптического сигнала.

Для ВОГ навигационного класса точности требуется высокая стабильность центральной длины волны. Смещение центральной длины волны выходного оптического сигнала ЭВСИ главным образом влияет на масштабный коэффициент ВОГ, определяемый формулой Саньяка:

$$\varphi_s = MK \cdot \Omega = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega, \quad (2)$$

где MK – масштабный коэффициент ВОГ, φ_s – фаза Саньяка, Ω – угловая скорость. Согласно выражению (2), масштабный коэффициент обратно пропорционален центральной длине волны λ ЭВСИ, и, таким образом, изменение центральной длины волны напрямую влияет на точность выходного сигнала ВОГ.

Серьезным препятствием на пути применения ЭВСИ и эрбиевых ВС в космосе, а также вблизи ядерных реакторов и других источников ИИ является их крайне низкая радиационная стойкость: уже при дозах ~ 100 Гр РНП в эрбиевых ВС столь велики, что система утрачивает работоспособность [26–28].

Согласно работе [29], протонное излучение существенно увеличивает потери на длине волны 0,98 мкм, снижая тем самым эффективность накачки активного ВС. Величина РНП при протонном излучении составляет $0,8 \cdot 10^{-2}$ – $1,6 \cdot 10^{-2}$ дБ/м·Гр для длины волны 0,98 мкм [29] или $2 \cdot 10^{-2}$ – $7 \cdot 10^{-2}$ дБ/м·Гр для длины волны 0,95 мкм [30]. Кроме того, протонное ИИ вызывает резкое снижение уровня люминесценции, обусловленное двумя процессами: увеличением РНП в диапазоне длин волн 1,53 мкм и ослаблением накачки в активном ВС. Среднее значение РНП для длины волны 1,53 мкм, согласно измерениям в работе [29], составляет от 2,4 до 3,3 дБ/м после дозы ИИ 300 Гр и с нарастанием дозы ИИ РНП на длине волны 1,53 мкм увеличивается на 20-50% медленнее, чем на длине волны 0,98 мкм.

Как показывают результаты работ [31–33], влияние протонного ИИ и гамма-излучения на ВС, легированный эрбием, идентично. Процесс ионизации приводит к увеличению потерь излучения накачки и выходного излучения, а также к деградации активного ВС в ЭВСИ. При этом, согласно [34], относительная деградация усиления спонтанного излучения не зависит от концентрации ионов эрбия в активном ВС. РНП в основном обусловлены точечными дефектами в сетке кварцевого стекла, связанными с примесями Al_2O_3 в световоде. ИИ вызывает изменения во временных параметрах люминесценции ионов эрбия, что также объясняется наличием примеси Al_2O_3 [35]. Спектры поглощения активных ВС до и после воздействия ИИ не отличаются, что свидетельствует о том, что ИИ не влияет на поглощающие свойства легирующих элементов (Al_2O_3/Er^{+3}), а воздействует только на сетку кварцевого стекла световода.

В работе [36] продемонстрирован метод повышения стабильности масштабного коэффициента ВОГ, находящегося под воздействием ИИ, за счет компенсации зависимости полуволнового напряжения фазового модулятора МИОС. Представленный метод заключается в непрерывной корректировке полуволнового напряжения МИОС, прямо пропорционального длине волны излучения, таким образом, чтобы скомпенсировать зависимость (возникающую из-за воздействия ИИ на ЭВСИ ВОГ) масштабного коэффициента, обратно пропорционального длине волны.

Для ВОГ интерференционного типа, функционирующего по замкнутой схеме обработки сигналов (close-loop, или с обратной связью), выражение для масштабного коэффициента с учетом полуволнового напряжения может быть записано следующим образом [36]:

$$MK = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \cdot \frac{1}{(\pi/V_\pi) \cdot (V_{pp}/2^N)}, \quad (3)$$

где V_π – полуволновое напряжение фазового модулятора МИОС, V_{pp} – напряжение, соответствующее фазовому сдвигу 2π в фазовом модуляторе МИОС, N – разрядность цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), используемого для подачи управляющего напряжения на МИОС. Полуволновое напряжение V_π может быть описано следующим выражением [36]:

$$V_\pi = \frac{\lambda G}{n^3 \gamma_{33} l \Gamma}, \quad (4)$$

где G – расстояние между электродами фазового модулятора МИОС, l – длина электродов, n – эффективный показатель преломления волноводов МИОС, γ_{33} – электрооптический коэффициент материала МИОС (LiNbO_3), Γ – коэффициент интеграла перекрытия.

Как видно из выражений (3) и (4), величины λ и V_π напрямую влияют на масштабный коэффициент ВОГ. Известные методы корректировки полуволнового напряжения в фазовом модуляторе ВОГ – так называемая вторая обратная связь и температурная компенсация V_π – могут только стабилизировать величину V_π/V_{pp} или компенсировать погрешность ВОГ из-за смещения V_π . Таким образом контролируется только второй множитель в выражении (3), при этом масштабный коэффициент ВОГ остается подверженным влиянию длины волны λ , входящей в первый множитель выражения (3).

Объединив выражения (3) и (4), можно переписать выражение для масштабного коэффициента ВОГ следующим образом [36]:

$$MK = \frac{2LD}{c} \cdot \frac{2^N}{V_{pp}} \cdot m, \quad (5)$$

$$m = \frac{V_\pi}{\lambda} = \frac{G}{n^3 \gamma_{33} l \Gamma}, \quad (6)$$

где m является параметром, характеризующим свойства фазового модулятора МИОС.

Если определить модель зависимости величины m/V_{pp} от температуры и стабилизировать ее, то удастся значительно снизить нестабильность масштабного

коэффициента МК под воздействием ИИ и температуры. Авторы работы [36] нашли такую модель, применили описанный метод компенсации и продемонстрировали следующие результаты: в диапазоне температур от -40 до $+60$ °С и при воздействии ИИ более 1 кГр для ВОГ класса точности 0,01 %/ч удалось снизить нестабильность масштабного коэффициента со 100 ppm до 10 ppm.

НЦВО РАН разработаны эрбиевые ВС для ЭВСИ с рекордно высокой радиационной стойкостью, позволяющей использовать их даже в космических системах [26]. Отличие от стандартной технологии состоит в нанесении в процессе вытяжки не полимерного, а герметичного покрытия (углеродного или металлического) и в последующем насыщении герметично покрытого ВС газом молекулярного водорода или дейтерия. Это делается путем размещения ВС в газостате при повышенной температуре и давлении. Возможно также использование известных химических катализаторов для облегчения прохождения молекул водорода или дейтерия через герметичное покрытие. Полученный таким образом ВС сохраняет газ в стекле в нормальных условиях на протяжении десятков лет.

Следует отметить, что аналогичного эффекта пропитки стекла ВС водородом или дейтерием можно достичь путем размещения бухты ВС в полимерном покрытии в герметичной камере, заполненной этим газом, непосредственно в процессе эксплуатации. Под действием ИИ (например, в космосе) происходит разрыв химических связей в сетке стекла ВС, то есть образуются точечные дефекты (центры окраски), поглощающие световой сигнал. Однако водород (дейтерий) проникает в сетку стекла на месте разорванных связей, тем самым «залечивая» центры окраски, и ВС сохраняет прозрачность.

По приблизительной оценке срок службы таких ВС, к примеру, в условиях космической радиации будет в ~ 30 раз больше, чем у современных коммерческих эрбиевых ВС. Радиационно стойкие эрбиевые ВС и способ их получения защищены патентом [37].

Радиационная стойкость электронных компонентов ВОГ

В состав современных ВОГ входит множество электронных компонентов, в частности электронные платы обработки оптического сигнала и управления модуляцией, информационного обмена и вторичного электропитания, а также фотоприемники, микросхемы ПЛИС (программируемые логические интегральные схемы), сигнальные процессоры, интерфейсные микросхемы информационного обмена, ЦАП и АЦП, кварцевые генераторы, усилители, фильтры, пассивные электронные компоненты.

За последнее время было проведено множество исследований радиационной стойкости отдельных электронных компонентов, в том числе и применяемых в ВОГ [38–44], и практически все эти компоненты в настоящее время возможно приобрести или заказать в радиационно устойчивом исполнении.

Радиационная стойкость стандартных электронных компонентов, применяемых не только в ВОГ, в данном обзоре подробно рассматриваться не будет. Далее кратко изложены основные проблемы обеспечения радиационной стойкости фотоприемников ВОГ и микросхем ПЛИС, использующихся для обработки сигналов ВОГ, и перечислены направления ее повышения.

Изготовление радиационно стойких фотоприемников возможно за счет повышения радиационных характеристик используемых материалов. В связи с этим важным является изучение влияния ионизирующего излучения на физические явления, происходящие в полупроводниковых материалах и структурах. В работе

[40] предложены принципы построения и рассмотрена технология изготовления радиационно стойких фотоприемников на основе слоистых полупроводников GaSe, InSe, GaTe. Такие фотоприемники способны сохранять работоспособность при достаточно высоких уровнях ИИ, в частности в условиях комического полета.

Разработчиками микросхем ПЛИС проделана большая работа по улучшению характеристик их радиационной стойкости на аппаратном уровне: специальные схемотехнические решения для ячеек памяти SRAM, повышение уровней сигналов, сохранение состояний узлов схемы с большим периодом, чем длительность импульса тока, вызванного ИИ, тройное резервирование особо чувствительных к радиационным воздействиям функциональных блоков микросхем, а также использование специальных технологических процессов при производстве, например изготовление ПЛИС по технологии «кремний на изоляторе» (SOI) и на основе карбида кремния (SiC). Конструктивным способом является использование охранных p^+ областей и транзисторов с кольцевой геометрией, что обеспечивает работоспособность ПЛИС при дозах облучения до 10 кГр [41, 42].

Разрабатываются и программные методы повышения радиационной стойкости микросхем ПЛИС – это сравнительное новое направление [43, 44]. Развитие и совершенствование программных методов позволяет в полной мере использовать возможности, заложенные разработчиками ПЛИС.

Следует отметить, что в связи с созданием ВОГ, предназначенных для работы в условиях значительных ИИ, необходимо рассматривать вопросы не только подбора радиационно стойких компонентов, но и организации радиационной защиты, экранирования наиболее уязвимых электронных компонентов.

Радиационная стойкость оптических клеев, компаундов, герметиков и прочих волоконно-оптических компонентов и материалов

Радиационная стойкость волоконно-оптических компонентов определяется прежде всего параметрами оптического волокна, из которого они выполнены. Для электронно-оптических и волоконно-оптических компонентов на базе изотропного одномодового волокна влияние гамма-излучения существенно меньше по сравнению с двулучепреломляющими (PMF) волокнами. В работе [38] показана стабильность характеристик некоторых узлов ВОГ при воздействии гамма-излучения с мощностью дозы 0,01 Гр/с (общая доза 1 кГр): SLD-диод, PIN-фотодетектор и волоконный X-разветвитель – все на изотропном оптическом волокне – сохранили свои основные параметры после воздействия. Образцы двулучепреломляющего волокна в аналогичных условиях показывают кратный рост оптических потерь и ухудшение поляризационных свойств (h -параметра), соответственно, волоконно-оптические компоненты на основе PMF-волокон могут быть подвержены влиянию ИИ. Существует очень мало публикаций по этому вопросу, поэтому дать количественную оценку чувствительности PMF волоконно-оптических компонентов к воздействию ИИ на данный момент затруднительно.

Радиационная стойкость клеев определяется в основном природой их полимерной основы, а также зависит от вида и содержания других компонентов. Многокомпонентный состав клеев затрудняет оценку их радиационной стойкости по типу полимерной основы. В случае если клей соединяет различные металлы или металлы с диэлектриками, клей подвергается дополнительному облучению вторичными электронами. Источником вторичных электронов служит

облучаемый материал, поэтому поглощенная клеевой прослойкой доза излучения возрастает в несколько раз [45].

Изменение различных свойств пропиточных и заливочных компаундов при воздействии излучений определяется в первую очередь содержанием в них смол, отвердителей, пластификаторов, наполнителей и т.п., а также чистотой компонентов, технологией отверждения и условиями облучения. Наиболее заметно под действием радиации, начиная с поглощенной дозы излучения 10^6 рад, изменяются удельная ударная вязкость и прочность при статическом изгибе. Вместе с тем для ряда компаундов облучение до поглощенных доз 10–100 кГр упрочняет материалы за счет радиационного доотверждения (процесса «сшивки»), аналогичного термообработке. У компаундов на основе эпоксидных смол наблюдается увеличение теплостойкости под действием облучения. Диэлектрические показатели и электрическая прочность компаундов после облучения ухудшаются, а удельное электрическое сопротивление, снижаясь в процессе облучения на 1-6 порядков, восстанавливается через некоторое время после прекращения облучения [46].

Резины и герметики при облучении на воздухе окисляются, причем степень окисления определяется толщиной материала. Процесс окисления сопровождается выделением летучих продуктов, образующихся при распаде кислородосодержащих групп, и возрастанием плотности. При интенсивном протекании деградации плотность резин и герметиков уменьшается. В процессе радиолиза при облучении на воздухе в зависимости от состава материала выделяются: H_2 , CO , CO_2 , SiF_4 , COS , HCl , HF , фторуглероды, фторуглеводороды, серосодержащие соединения и вода. Эти продукты вызывают коррозию различных металлов и изменяют химический состав жидких и газообразных диэлектриков, используемых в электрооборудовании. Для большинства электроизоляционных резин электрические свойства ухудшаются при увеличении поглощенной дозы излучения. Наиболее низкой радиационной стойкостью обладают материалы на основе бутилкаучука, весьма высокой – материалы на основе натурального каучука. Сильное разрушающее действие на резины при облучении оказывает озон, особенно если резины находятся в напряженном состоянии. Озон также способствует более интенсивному процессу окисления резин и герметиков [47].

Заключение

Проанализирована проблема радиационной стойкости ВОГ и их основных компонентов (ВС, элементов интегральной оптики, источников оптического излучения, пассивных оптических компонентов и материалов, оптоэлектронных и электронных компонентов и других применяемых в ВОГ материалов) по материалам отечественных и зарубежных публикаций.

Рассмотрены возможные пути повышения радиационной стойкости (сохранения надежного функционирования под воздействием ИИ) составных частей ВОГ.

В частности, для ВС решением проблемы недостаточной радиационной стойкости (больших величин РНП) может быть применение вместо германосиликатного стекла кварцевого стекла, легированного азотом, а также изготовление световодов с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и фторсиликатной светоотражающей оболочкой. Это позволит снизить РНП примерно в 5 раз (с ~ 10 до ~ 2 дБ/км) [10]. Влияние ИИ на механические свойства ВС можно ослабить, изменив состав и число защитных покрытий, например, включением в состав световода промежуточного спецлака или нанесением поверх

оболочки покрытия из полимера. Кроме того, для повышения радиационной стойкости германий и другие легирующие добавки, кроме фтора, должны быть исключены из химического состава ВС. Часть из этого в настоящее время уже реализована и применяется в серийном изготовлении радиационно стойких волокон. Тем не менее следует отметить, что эффекты в ВС, вызванные воздействием радиации, изучены не до конца, и продолжают как теоретические, так и экспериментальные исследования. К настоящему времени известны неполные модели радиационных процессов в ВС и их приближительная физическая интерпретация.

При изготовлении МИОС на основе кристалла ниобата лития, предназначенных для работы в условиях ИИ, необходимо иметь в виду, что легирование кристаллов может существенно изменять их чувствительность к повреждению ИИ. Кроме того, ИИ практически не оказывает воздействия на полуволновое напряжение модулятора МИОС и в очень малой степени влияет на свойства разветвителя МИОС на тех длинах волн оптического излучения, которые чаще всего используются в ВОГ. В области повышения радиационной устойчивости МИОС необходимо продолжать изучение воздействия ИИ на МИОС с волноводами, изготовленными по технологии диффузии титана, а также на разветвители Х-типа [22, 23].

Что касается ЭВСИ, использующихся в высокоточных ВОГ, то было проведено множество исследований по повышению их радиационной стойкости, в том числе и в России. запатентована технология [37] изготовления специального легированного эрбием ВС для ЭВСИ, отличающаяся от стандартной нанесением в процессе вытяжки ВС углеродного или металлического герметичного покрытия и насыщением ВС молекулярным водородом. Ожидается, что срок службы таких ВС, к примеру, в условиях космической радиации будет примерно в 30 раз больше, чем у коммерческих эрбиевых ВС. В этой области появились экспериментальные исследования [26, 37].

Разработка новых видов фотоприемников (и других электрооптических компонентов ВОГ), стойких к воздействию ИИ различного вида, осуществляется за счет повышения радиационных характеристик используемых материалов. В частности, предложены принципы построения и рассмотрена технология изготовления радиационно стойких фотоприемников на основе слоистых полупроводников GaSe, InSe, GaTe [40]. Экспериментальные исследования подтвердили перспективность предложенного направления [40].

В части электронных компонентов производителями микросхем ПЛИС, применяемых в ВОГ в схеме обработки сигнала, проделана большая работа по улучшению характеристик радиационной стойкости микросхем на аппаратном уровне, используются также специальные технологические процессы при производстве. Разрабатываются и программные методы повышения радиационной стойкости микросхем ПЛИС [41–44]. Для прочих стандартных электронных компонентов в настоящее время существует широкая номенклатура радиационно стойких исполнений.

При выборе оптических клеев, эпоксидных смол, силиконовых компаундов, герметиков, уплотнительной резины и прочих пассивных компонентов и материалов для ВОГ, предназначенных для работы в условиях ИИ, необходимо учитывать их радиационную стойкость. Изменение их свойств при воздействии ИИ определяется прежде всего содержанием в них смол, отвердителей, пластификаторов, наполнителей и т.д., а также чистотой компонентов, технологией отверждения и условиями облучения [45–47].

В заключение следует отметить, что при разработке ВОГ, предназначенных для работы в условиях значительных ИИ, необходимо рассматривать не только вопрос подбора радиационно стойких компонентов, но и организации радиационной защиты, экранирования наиболее уязвимых электронных и оптоэлектронных компонентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуськов Н.А. Волоконная оптика в радиационной обстановке // Зарубежная радиоэлектроника. 1991. № 8. С. 52–65.
2. Бекман И.Н. Радиоактивность и радиация. Курс лекций. М., 2006.
3. Томашук А.Л., Голант К.М., Забейайлов М.О. Разработка волоконных световодов для применения при повышенном уровне радиации // Волоконно-оптические технологии, материалы и устройства. 2001. № 4. С. 52–65.
4. Дианов Е.М. Перспективы использования диапазона длин волн 1-1,6 мкм для осуществления волоконно-оптической связи // Квантовая электроника. 1980. Т. 7. № 3. С. 458–464.
5. Кирич И.Г. Специальные радиационно устойчивые волоконно-оптические и оптоэлектронные датчики и системы, 2008.
6. Томашук А.Л., Дворецкий Д.А., Лазарев В.А., Пнев А.Б., Карасик В.Е., Салганский М.Ю., Кашайкин П.Ф., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. Отечественные радиационно-стойкие волоконные световоды // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 5. С. 111–124.
7. Беляев Р.А., Таценко В.Г. Радиационная устойчивость волоконных световодов // Зарубежная радиоэлектроника. 1990. № II. С. 94–108.
8. Chigusa, Y., Watanabe, M., Kyoto, M., Ooe, M., Matsubara, T., γ -Ray and neutron irradiation characteristics of pure silica core single mode fiber and its life time estimation, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1988, Feb., vol. 35, no. 1.
9. Долгов И.И., Иванов Г.А., Чаморовский Ю.К., Яковлев М.Я. Радиационно стойкие одномодовые оптические волокна с кварцевой сердцевиной // Фотон-Экспресс. 2005. № 6 (46). С. 4–10.
10. Кашайкин П.Ф., Салганский М.Ю., Томашук А.Л., Абрамов А.Н., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Нищев К.Н., Дианов Е.М. Повышение радиационной стойкости волоконных световодов в технологии MCVD // Фотон-Экспресс. 2013. № 6. С. 152–153.
11. Aikawa, K., Izoe, K., Shamoto, N., Kudoh, M., Tsumanuma, T., Radiation resistant singlemode optical fiber and method of manufacturing thereof. U.S. Patent 7440673, Oct. 21, 2008.
12. Alam, M., Abramczyk, J., Manyam, U., Farroni, J., Guertin, D., Performance of Optical Fibers in Space Radiation Environment, *International Conference on Space Optics*, Noordwijk, The Netherlands, 2006.
13. Hill, M., Hankey, J., Gray, R., Radiation tolerant passive and active optical fiber products for use in space environments, *Proc. SPIE 10563*, International Conference on Space Optics – ICSO 2014, 1056328.
14. Палатников М.Н., Ефремов И.Н., Сидоров Н.В., Макарова О.В., Калинин В.Т. Исследования свойств гамма-облученных кристаллов ниобата лития различного химического состава // Труды Кольского научного центра РАН. Химия и материаловедение: спецвыпуск. 2015. № 5 (31). С. 439–443.
15. Barnes, C., Greenwel, R., Radiation effects in photonic modulator structures. Photonics for space environments, *Proc of SPIE*, 1995, vol. 2482, pp. 48–83.
16. Pentrack, D., Hatch, J., et al., Effects of combined neutron and gamma radiation on a LiNbO3 directional polarization maintaining coupler (passive) and a large core multimode 1X2 coupler. Photonics for Space environments, *Proc of SPIE*, 1995, vol. 2482, pp. 109–119.
17. Lai, C.-C., Chang, C.-Y., Wei, Y.-Y., Wang, W.-S., Study of gamma-irradiation damage in LiNbO3 waveguides, *Photonics Tech. Lett.*, 2007, 19 (13), pp. 1002–1004.
18. Kanofsky, A.S., Proton radiation effects on various electro-optical devices, *Proc. of SPIE*, 1994, vol. 2074, pp. 204–213.
19. Dewen, L., Wen, X., Bo, W., Mechanism of radiation effects on fiber optic gyros, *ActaOptica Sinica*, 2008, 28 (3), pp. 419–422.
20. Desheng, Z., Hongkun, H., Effects of proton radiation on LiNbO3 multifunction integrated optical circuit, *Semiconductor optoelectronics*, 2011, 32(3), pp. 343–347.
21. Ding, D., et al., The Effects of Space Irradiation on the Performances of Y-waveguide Multifunction Integrated Optical Circuit, *International Conference on Optoelectronics and Microelectronics (ICOM)*, 2015, pp. 111–114.

22. Пат. 2444704 Российская Федерация, МПК G01C 19/72. Волоконно-оптический гироскоп / А.С. Алейник, И.К. Мешковский, В.Е. Стригалева; патентообладатель АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». № 2010144351/28; заявл. 26.10.10; опубл. 10.03.12, Бюл. № 16. 14 с.
23. Мешковский И.К., Стригалева В.Е., Дейнека Г.Б., Пешехонов В.Г., Волинский Д.В., Унтилов А.А. Трехосный волоконно-оптический гироскоп. Результаты разработки и пред-варительных испытаний // Гироскопия и навигация. 2011. № 3. С. 67–74.
24. Hsu, Z., Peng, Z., Wang, L.A., Liu, R., Chou, F., Gamma ray effects on double pass backward superfluorescent fiber source for gyroscope application, *Proc of SPIE*, 2008, vol. 7004, 70044M.
25. Zhang, B., Wang, W., Wang, X., Li, J., Wang, D., Research on the irradiation characteristic of erbium-doped fiber source for high precision fiber-optic gyroscope, Presented at the Initial Sensors and Systems conf., Karlsruhe, Germany, 2013.
26. Лихачев М.Е., Зотов К.В., Томашук А.Л., Бубнов М.М., Семенов С.Л., Косолапов А.Ф., Яшков М.В., Гурьянов А.Н. Радиационно стойкие эрбиевые волоконные световоды для гироскопов и систем космической связи // Фотон-экспресс. 2009. № 6. С. 17–18.
27. Brichard, B., et al., Gamma dose rate effect in erbium-doped fibers for space gyroscopes, 2003, pp. 336–338.
28. Wang, W., Wang, X., Xia, J., The influence of Er-doped fiber source under irradiation on fiber optic gyro, *Optical Fiber Technology* 18, 2012, pp. 39–43.
29. Girard, S., Torteche, B., Regnier, E., et al., Proton- and Gamma-induced effects on erbium-doped optical fibers, IEEE Transactions on Nuclear Science, December 2007, vol. 54, no. 6.
30. Brichard, B., Fernandez-Fernandez, A., Ooms, H., Bergmans, F., Study of the radiation-induced optical sensitivity in erbium and aluminum doped fibers, Presented at the RADEC conf., Noordwijk, The Netherlands, 2003.
31. Williams, G.M., Putnam, M.A., Friebele, E.J., Space radiation effects on erbium doped fibers, *Proc. SPIE*, 1996, vol. 2811, pp. 30–37.
32. Rose, T.S., Gunn, D., Valley, G.C., Gamma and proton radiation effects in erbium-doped fiber amplifiers: active and passive measurements, *J. Lightw. Technol.*, 2001, vol. 19, no. 12, pp. 1918–1923.
33. Williams, G.M., Friebele, E.J., Space radiation effects on erbium-doped fiber devices: sources, amplifiers and passive measurements, IEEE Transactions on Nuclear Science, 1998, vol. 45, no. 3, pp. 399–404.
34. Torteche, B., VanUffelen, M., Gusarov, A., et al., Gamma radiation-induced loss in erbium doped optical fibers, *J. Non-Cryst. Solids*, April 2007, vol. 353, no. 5–7, pp. 477–480.
35. Van Uffelen, M., Girard, S., Goutaland, F., Gusarov, A., Brichard, B., Berghmans, F., Gamma radiation effects in Er-doped silica fibers, IEEE Transactions on Nuclear Science, October 2004, vol. 51, no. 5, pp. 2763–2769.
36. Yang, Y., Yang, F., High performance fiber optic gyroscope with a radiation-tolerant ant temperature-stable scale factor, *Chinese Optic Letters*, November 2016, col. 14 (11), no. 110605.
37. Томашук А.Л и др. Волоконный световод (варианты) и способ его получения. Патент РФ № 2222032 от 20.01.2004 г., приоритет от 29.06.2000 г.
38. Ding, D., et al., Radiation Effects on Opto-Electronic Devices for Fiber-Optic Gyroscopes, *Academic International Symposium on Optoelectronics and Microelectronics Technology*, 2011, pp. 216–218.
39. Zhang, C., et al., Space radiation effect on fibre optical gyroscope control circuit and compensation algorithm, *Chinese Physics B*, 17 (2), 573–577.
40. Аскеров К.А. Радиационно стойкие фотоприемники на основе слоистых полупроводников GaSe, InSe, GaTe: Дис. ... доктора физико-математических наук: 01.04.01. Баку, 2000. 37 с.
41. Юдинцев В. Радиационно стойкие интегральные схемы. Надежность в космосе и на Земле // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. № 5. С. 72–77.
42. МIRONENKO Л., ЮДИНЦЕВ В. Повышение радиационной стойкости интегральных схем. Конструктивные методы на базе промышленной технологии // Электроника. 2012. №8. С. 74–87.
43. Соколов А.Г. Программно-аппаратные методы повышения радиационной стойкости микросхем SRAM ПЛИС // Современная электроника. 2014. № 6. С. 30–33.
44. Муллоев К.Д. Воздействие космической радиации на цифровые устройства на базе ПЛИС и методы повышения радиационной стойкости данных систем // Труды МАИ. 2016. Вып. № 87.
45. Радиационная стойкость клеев: [Электронный ресурс]. URL: http://ftemk.mpei.ru/ctlw/DocHandler.aspx?p=pubs/etm_full/radiationf/06.08.htm. (Дата обращения: 27.09.2017).
46. Воздействие облучения на компаунды: [Электронный ресурс]. URL: http://ftemk.mpei.ru/ctlw/DocHandler.aspx?p=pubs/etm_full/radiationf/06.06.htm. (Дата обращения: 27.09.2017).
47. Воздействие облучения на резины и герметики: [Электронный ресурс]. http://ftemk.mpei.ru/ctlw/DocHandler.aspx?p=pubs/etm_full/radiationf/06.07.htm. (Дата обращения: 27.09.2017).

Egorov, D.A., Rupasov, A.V., Untilov, A.A. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russia). Ensuring Radiation Resistance of Fiber Optic Gyroscopes and Ways to Improve It: Review, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2018, vol. 26, no. 4 (103), pp. 23–42.

Abstract. The problem of ensuring the radiation resistance of fiber-optic gyroscopes and their main components (optical fibers, elements of integrated optics, optical sources, electronic components and optical materials) is analyzed on the basis of Russian and foreign publications. Possible ways of radiation resistance improvement are considered.

Key words: fiber-optic gyro, radiation resistance.

REFERENCES

1. **Gus'kov, N.A.**, Fiber optics in the radiation environment, *Zarubezhnaya radioelektronika*, 1991, no. 8, pp. 52–65.
2. **Bekman, I.N.**, *Radioaktivnost' i radiatsiya. Kurs lektsii* (Radioactivity and Radiation, Course of lectures), Moscow, 2006.
3. **Tomashuk, A.L., Golant, K.M., and Zabezhailov, M.O.**, Development of optical fibers for use at increased levels of radiation, *Volokonno-opticheskie tekhnologii, materialy i ustroystva*, 2001, no. 4, pp. 52–65.
4. **Dianov, E.M.**, Prospects for using the wavelength range of 1-1.6 microns for the implementation of fiber-optic communication, *Kvantovaya elektronika*, 1980, vol. 7, no. 3, pp. 458–464.
5. **Kirin, I.G.**, *Spetsial'nye radiatsionno ustoychivye volokonno-opticheskie i optoelektronnyye datchiki i sistemy* (Special Radiation-Resistant Fiber-Optic and Optoelectronic Sensors and Systems), 2008.
6. **Tomashuk, A.L., Dvoretzkii, D.A., Lazarev, V.A., Pnev, A.B., Karasik, V.E., Salganskii, M.Yu., Kashaikin, P.F., Hopin, V.F., Gur'yanov, A.N., and Dianov, E.M.**, Domestic radiation-resistant optical fibers, *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana, Ser. Priborostroenie*, 2016, no. 5, pp. 111–124.
7. **Belyaev, R.A. and Tatsenko, V.G.**, Radiation resistance of optical fibers, *Zarubezhnaya radioelektronika*, 1990, no. II, pp. 94–108.
8. **Chigusa, Y., Watanabe, M., Kyoto, M., Ooe, M., and Matsubara, T.**, γ -Ray and neutron irradiation characteristics of pure silica core single mode fiber and its life time estimation, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1988, Feb., vol. 35, no. 1.
9. **Dolgov, I.I., Ivanov, G.A., Chamorovskii, Iu.K., and Yakovlev, M.Ya.**, Radiation-resistant single-mode optical fibers with a quartz core, *Foton-Ekspress*, 2005, no. 6 (46), pp. 4–10.
10. **Kashaikin, P.F., Salganskii, M.Yu., Tomashuk, A.L., Abramov, A.N., Khopin, V.F., Gur'yanov, A.N., Nishchev, K.N., and Dianov, E.M.**, Increasing radiation resistance of optical fibers in MCVD technology, *Foton-Ekspress*, 2013, no. 6, pp. 152–153.
11. **Aikawa, K., Izo, K., Shamoto, N., Kudoh, M., and Tsumanuma, T.**, Radiation resistant single-mode optical fiber and method of manufacturing thereof. U.S. Patent 7440673, Oct. 21, 2008.
12. **Alam, M., Abramczyk, J., Manyam, U., Farroni, J., and Guertin, D.**, Performance of optical fibers in space radiation environment, *International Conference on Space Optics*, Noordwijk, The Netherlands, 2006.
13. **Hill, M., Hankey, J., and Gray, R.**, Radiation tolerant passive and active optical fiber products for use in space environments, *Proc. SPIE 10563*, International Conference on Space Optics – ICSO 2014, 1056328.
14. **Palatnikov, M.N., Efremov, I.N., Sidorov, N.V., Makarova, O.V., and Kalinnikov, V.T.**, Studying the properties of gamma-irradiated lithium niobate crystals of different chemical composition, *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Khimiya i materialovedenie: Spetsvyпуск*, 2015, no. 5 (31), pp. 439–443.
15. **Barnes, C. and Greenwel, R.**, Radiation effects in photonic modulator structures. Photonics for space environments, *Proc. of SPIE*, 1995, vol. 2482, pp. 48–83.
16. **Pentrack, D., Hatch, J. et al.**, Effects of combined neutron and gamma radiation on a LiNbO3 directional polarization maintaining coupler (passive) and a large core multimode 1X2 coupler. Photonics for space environments, *Proc. of SPIE*, 1995, vol. 2482, pp. 109–119.
17. **Lai, C.-C., Chang, C.-Y., Wei, Y.-Y., and Wang, W.-S.**, Study of gamma-irradiation damage in LiNbO3 waveguides, *Photonics Tech. Lett.*, 2007, 19 (13), pp. 1002–1004.

18. **Kanofsky, A.S.**, Proton radiation effects on various electro-optical devices, *Proc. of SPIE*, 1994, vol. 2074, pp. 204–213.
19. **Dewen, L., Wen, X., and Bo, W.**, Mechanism of radiation effects on fiber optic gyros, *ActaOptica Sinica*, 2008, 28 (3), pp. 419–422.
20. **Desheng, Z., and Hongkun, H.**, Effects of proton radiation on LiNbO₃ multifunction integrated optical circuit, *Semiconductor optoelectronics*, 2011, 32(3), pp. 343–347.
21. **Ding, D., et al.**, The effects of space irradiation on the performances of Y-waveguide multifunction integrated optical circuit, *International Conference on Optoelectronics and Microelectronics (ICOM)*, 2015, pp. 111–114.
22. **Patent RF (Russian Federation) no. 2444704**, Aleinik, A.S., Meshkovskii, I.K., and Strigalev, V.E., Fiber-optic gyroscope, Patent holder Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russia, 26.10.10.
23. **Meshkovskii, I.K., Strigalev, V.E., Deineka, G.B., Peshekhonov, V.G., Volynskii, D.V., and Untilov, A.A.**, A Three-Axis Fiber-Optical Gyroscope. The Results of the Development and Tests, *Gyroscopy and Navigation*, 2011, vol. 2, no. 4, pp. 208–213.
24. **Hsu, Z., Peng, Z., Wang, L.A., Liu, R., and Chou, F.**, Gamma ray effects on double pass backward superfluorescent fiber source for gyroscope application, *Proc of SPIE*, 2008, vol. 7004, 70044M.
25. **Zhang, B., Wang, W., Wang, X., Li, J., and Wang, D.**, Research on the irradiation characteristic of erbium-doped fiber source for high precision fiber-optic gyroscope, Presented at *the Inertial Sensors and Systems Conf.*, Karlsruhe, Germany, 2013.
26. **Likhachev M.E., Zotov K.V., Tomashchuk A.L., Bubnov M.M., Semenov S.L., Kosolapov A.F., Yashkov M.V., and Gur'anov A.N.**, Radiation-resistant erbium optical fibers for gyroscopes and space communication systems, *Foton-Ekspres*, 2009, no. 6, pp. 17–18.
27. **Brichard, B., et al.**, Gamma dose rate effect in erbium-doped fibers for space gyroscopes, 2003, pp. 336–338.
28. **Wang, W., Wang, X., and Xia, J.**, The influence of Er-doped fiber source under irradiation on fiber optic gyro, *Optical Fiber Technology* 18, 2012, pp. 39–43.
29. **Girard, S., Tortech, B., Regnier, E., et al.**, Proton- and gamma-induced effects on erbium-doped optical fibers, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, December 2007, vol. 54, no. 6.
30. **Brichard, B., Fernandez-Fernandez, A., Ooms, H., and Bergmans, F.**, Study of the radiation-induced optical sensitivity in erbium and aluminum doped fibers, Presented at the *RADEC Conf.*, Noordwijk, The Netherlands, 2003.
31. **Williams, G.M., Putnam, M.A., and Friebele, E.J.**, Space radiation effects on erbium doped fibers, *Proc. SPIE*, 1996, vol. 2811, pp. 30–37.
32. **Rose, T.S., Gunn, D., and Valley, G.C.**, Gamma and proton radiation effects in erbium-doped fiber amplifiers: active and passive measurements, *J. Lightw. Technol.*, 2001, vol. 19, no. 12, pp. 1918–1923.
33. **Williams, G.M. and Friebele, E.J.**, Space radiation effects on erbium-doped fiber devices: sources, amplifiers and passive measurements, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1998, vol. 45, no. 3, pp. 399–404.
34. **Tortech, B., VanUffelen, M., Gusarov, A., et al.**, Gamma radiation-induced loss in erbium doped optical fibers, *J. Non-Cryst. Solids*, April 2007, vol. 353, no. 5–7, pp. 477–480.
35. **Van Uffelen, M., Girard, S., Goutaland, F., Gusarov, A., Brichard, B., Berghmans, F.**, Gamma radiation effects in Er-doped silica fibers, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, October 2004, vol. 51, no. 5, pp. 2763–2769.
36. **Yang, Y. and Yang, F.**, High performance fiber optic gyroscope with a radiation-tolerant ant temperature-stable scale factor, *Chinese Optic Letters*, November 2016, col. 14 (11), no. 110605.
37. **Patent RF (Russian Federation) no. 2222032, 20.01.2004**. Tomashuk, A.L. et al., Optical fiber (versions) and methods for producing it.
38. **Ding, D., et al.**, Radiation effects on opto-electronic devices for fiber-optic gyroscopes, *Academic International Symposium on Optoelectronics and Microelectronics Technology*, 2011, pp. 216–218.
39. **Zhang, C., et al.**, Space radiation effect on fibre optical gyroscope control circuit and compensation algorithm, *Chinese Physics B*, 17 (2), 573–577.
40. **Askerov, K.A.**, Radiation-resistant photodetectors based on layered semiconductors GaSe, InSe, GaTe: Doctor Sci. (Physics and Mathematics) Dissertation, Baku, 2000.
41. **Yudintsev, V.**, Radiation-resistant integrated circuits. Reliability in space and on Earth. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes*, 2007, no. 5, pp. 72–77.
42. **Mironenko, L. and Yudintsev, V.**, Increasing the radiation resistance of integrated circuits. Constructive methods based on industrial technology, *Elektronika*, 2012, no.8, pp. 74–87.

43. **Sokolov, A.G.**, Software and hardware methods to improve the radiation resistance of PLIC for SRAM, *Sovremennaya elektronika*, 2014, no. 6, pp. 30–33.
44. **Mullov, K.D.**, The impact of space radiation on digital PLIC-based devices and methods for improving the radiation resistance of these systems, *Trudy MAI*, 2016, vol. 87.
45. **Radiation resistance** of adhesives http://itemk.mpei.ru/ctlw/DocHandler.aspx?p=pubs/etm_full/radiationf/06.08.htm. Accessed September 27, 2017.
46. **Irradiation effects** of on compounds: http://itemk.mpei.ru/ctlw/DocHandler.aspx?p=pubs/etm_full/radiationf/06.06.htm. Accessed September 27, 2017.
47. **Irradiation effects** on resins and sealing materials: http://itemk.mpei.ru/ctlw/DocHandler.aspx?p=pubs/etm_full/radiationf/06.07.htm. Accessed September 27, 2017.

Материал поступил 09.07.2018