

Одномодовый световод W-типа, устойчивый к изгибу и радиации

© М.А. Ероньян,¹ А.Ю. Кулеш,¹ А.А. Реуцкий,¹ Д.Р. Девятьяров,¹ И.С. Никитин,¹ А.А. Унтилов,¹
Д.В. Волинский,¹ И.А. Овчинникова,² Ю.К. Чаморовский,³ А.А. Печенкин⁴

¹ АО «Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор»,
197046 Санкт-Петербург, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности,
111024 Москва, Россия

³ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
141190 Фрязино, Московская обл., Россия

⁴ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409 Москва, Россия
e-mail: eronyan@mail.ru

Поступило в Редакцию 15 февраля 2020 г.

В окончательной редакции 20 апреля 2020 г.

Принято к публикации 20 апреля 2020 г.

Установлено, что одномодовые фторсиликатные волоконные световоды, изготавливаемые модифицированным методом химического парофазного осаждения, резко снижают радиационную стойкость при введении в сердцевину из кварцевого стекла 1 mol.% GeO₂. Устранением примесей хлора и ОН-групп из кварцевого стекла сердцевины фторсиликатного одномодового волоконного световода достигнут низкий уровень радиационно-наведенных оптических потерь. Затухание волоконного световода до радиационной обработки равно 0.18 и 0.3 dB/km на длине волны 1.55 и 1.31 μm соответственно. Исследована зависимость оптических потерь таких световодов от диаметра их изгиба в диапазоне 6–12 mm.

Ключевые слова: MCVD-метод, одномодовые световоды, фторсиликатная оболочка, оптические потери, радиационная стойкость.

DOI: 10.21883/JTF.2020.12.50134.53-20

Введение

Потребность в радиационно-стойких волоконных световодах (PCVC), предназначенных для работы в условиях повышенного радиационного фона и особо низких температур, актуальна для целого ряда важных применений, в первую очередь для космической техники. В нашей стране Институты Российской академии наук ведут разработки таких волоконных световодов (ВС) не самым производительным, но универсальным методом MCVD (Modified chemical vapor deposition) [1]. Сердцевина PCVC состоит из чистого кварцевого стекла, а оболочка — из фторсиликатного стекла [2–4]. Из-за многоступенчатого радиального профиля показателя преломления (ПП) они называются ВС W-типа.

От обычных ВС ступенчатого типа они отличаются тем, что излучение в них вытекает в наружную оболочку с повышенным ПП по сравнению с фторсиликатной оболочкой. Для практически полного исключения этого явления диаметр фторсиликатной оболочки одномодовых ВС должен не менее, чем в 8 раз, превышать диаметр сердцевины из чистого кварцевого стекла [5]. Незначительное увеличение ПП сердцевины за счет ее легирования GeO₂ позволяет снизить это соотношение до 6 [6], что существенно (на 70%) может сократить длительность процесса осаждения оболочки. О целесообразности введения диоксида германия в сердцевину PCVC

свидетельствуют результаты работы [7], выявившей более высокую радиационную стойкость германосиликатных ВС в сравнении с фторсиликатными. Последующие исследования [8,9] подтвердили высокую радиационную стойкость многомодовых германосиликатных ВС.

Другой отличительной особенностью фторсиликатных ВС, изготавливаемых MCVD-методом, является способ нанесения отражающей депрессированной оболочки. Она может формироваться одностадийным способом, когда осаждение частиц SiO₂ на внутреннюю поверхность трубки, их спекание и легирование фтором происходят за один проход горелки [2]. Альтернативный, более сложный двухстадийный, способ нанесения оболочки осуществляется за два прохода горелки. На первом проходе она при осаждении слоя частиц SiO₂ движется навстречу потоку парогазовой смеси, содержащей кислород и пары SiCl₄. На втором проходе при спекании и фторировании пористого слоя горелка перемещается попутно с направлением подачи в трубку газообразного фторирующего реагента (SiF₄, SF₆ и др.) [4].

В двухстадийном способе осаждения оболочки осаждаемые слои стекла содержат существенно меньше примесного хлора, чем в одностадийном способе. Этот элемент, наряду с примесными группами ОН, является основной причиной увеличения радиационно-наведенных оптических потерь (РНП) фторсиликатных ВС с сердцевиной из чистого кварцевого стекла [10].

Таблица 1. Параметры заготовок ВС

№ заготовки	Диаметр оболочки (SiO ₂ -F), mm	Диаметр сердцевины, mm	Диаметр заготовки, mm	Состав сердцевины	Δn_o	Δn_c
1	8.0	1.0	17.4	0.99SiO ₂ -0.01GeO ₂	-0.006	+0.0015
2	9.3	0.91	16.3	SiO ₂	-0.0095	0

Примечание. Δn_o и Δn_c — разность ПП фторсиликатной оболочки и сердцевины относительно наружной оболочки из чистого кварцевого стекла соответственно

В то же время присутствие 0.1 at.% хлора в германо-силикатном ВС почти в 10 раз снижает РНП [11].

Наилучшей радиационной стойкостью обладают фтор-силикатные одномодовые ВС фирмы „Fujikura“ [12], производимые по сложной технологии, сочетающей VAD- и OVD-методы изготовления заготовок. Аналогичные изделия производит фирма „Draka“ [13].

Изготавливаемые по более простой MCVD-технологии [2,14,15] образцы фторсиликатных одномодовых РСВС Российской академии наук, не уступают по качеству аналогичным ВС зарубежных ведущих фирм. Высокий уровень радиационной стойкости в них достигается минимизацией содержания примесного хлора и созданием избытка кислорода при осаждении слоев сердцевины из чистого кварцевого стекла.

С утверждением о положительном влиянии избытка кислорода при осаждении слоев из чистого кварцевого стекла трудно согласиться, так как в одномодовом ВС концентрация кислорода и хлора в сердцевине определяется в основном условиями высокотемпературного сжатия трубки с осажденными слоями [16].

Изгиб ВС является эффективным инструментом в части ряда практических применений, когда их необходимо намотать на катушки датчиков малого диаметра. В этом отношении ВС W-типа более приемлемы, чем ВС с компенсированной по ПП оболочкой [17] из-за их осциллирующего характера ослабления излучения при его деформации [18]. Для ослабления таких осцилляций целесообразно использовать излучение коротковолнового края прозрачности кварцевых ВС (1.31 μm) и повышать разность ПП сердцевины и оболочки.

Такая длина волны перспективна и для оптического кабеля дальней связи, так как она соответствует длине волны с нулевой дисперсией. Целью настоящей работы является исследование влияния на РНП при температуре -60°C малых добавок GeO₂ в сердцевину фторсиликатного одномодового ВС, изготавливаемого MCVD-методом, и влияния его изгиба на оптические потери на длине волны 1.31 μm .

1. Методика эксперимента

MCVD-методом на автоматизированном комплексе OFC-12-729 фирмы „Nextrom“ изготовлены две заготовки одномодовых ВС W-типа, на основе кварцевых труб из стекла марки F300 с наружным диаметром 25 mm

и толщиной стенки 3 mm. На рефрактометре P-101 измерен радиальный профиль ПП заготовок и геометрические параметры их поперечного сечения (табл. 1). При изготовлении заготовки № 1 фторсиликатную оболочку наносили одностадийным методом, а для образца № 2 — двухстадийным. Сердцевина заготовки № 1 легирована GeO₂ на уровне 1 mol.%, а сердцевина заготовки № 2 состояла из чистого кварцевого стекла.

Высокотемпературное сжатие заготовки проводили при температуре 2200–2250 $^\circ\text{C}$ и продувке ее внутреннего канала газом, содержащим не более 10⁻⁶ wt.% влаги. Длительность этой операции намеренно увеличили за счет повышенного противодавления внутри заготовки с целью более эффективного испарения хлора из слоя сердцевины. После сплавления внутреннего канала заготовки из нее вытягивали волокно диаметром 125 μm при температуре графитового нагревателя $\approx 2150^\circ\text{C}$ с одновременным нанесением защитного двухслойного эпоксиакрилатного УФ-отверждаемого защитно-упрочняющего покрытия толщиной 65 μm .

Оптические потери ВС определяли методом сравнения пропускания излучения для короткого и длинного (не менее 1000 m) отрезков волокна с использованием анализатора оптического спектра марки „Yokogawa AQ6370C“. Длину волны отсечки LP₁₁ моды измеряли на этом же приборе сопоставлением спектров пропускания на прямом и изогнутом отрезках РСВС. Зависимость оптических потерь (α_b) от диаметра изгиба волокна (d) на 180 $^\circ$ исследовали на длине волны 1.31 μm с использованием прибора „FOD-1208 Optical Tester“. Изменение диаметра изгиба волокна производили дискретно, с шагом в 1 mm. Ошибка средней арифметической величины из трех измерений α_b составляла 5%.

Исследование содержания фтора и хлора в поперечном срезе заготовок проводили на сканирующем электронном микроскопе „Jeol JSM-6480 LV“, снабженном спектрометром X-Max^N (производство „Oxford Instruments“, Великобритания).

Исследование радиационной стойкости 100-метровых отрезков РСВС на длине волны 1.31 μm при $(-60 \pm 5)^\circ\text{C}$ проводили с использованием изотопного источника ⁶⁰Co. Мощность дозы облучения величиной 1 Gy/s достигалась расположением ВС на определенном расстоянии от источника излучения. Однородность поля радиационного воздействия была на уровне 20%. Заданный уровень мощности дозы радиационной нагрузки

достигался через 4 с. Снижение мощности (в dB) проходящего по РСВС излучения в процессе облучения волокна регистрировали фотоприемником „Ophir PD300-IR“. Мощность зондирующего излучения на длине волны 1.31 μm снижена до 5 μW, для минимизации фотообесцвечивания наведенных радиацией дефектов [2,7]. Регистрируемое прибором изменение РНП с ростом накопленной дозы в процессе облучения отличалось нестабильностью в пределах ±5%.

2. Результаты и обсуждение

Длина волны отсечки высшей моды LP₁₁(λ_c) для двух ВС обеспечила одномодовый режим распространения излучения на длине волны 1.31 и 1.55 μm с оптическими потерями (α) менее 0.5 dB/km. В сравнении с РСВС фирмы „Draka“ [13] ВС № 1, легированный германием, незначительно уступает по затуханию на длине волны 1.31 μm, в то время как ВС № 2 имеет более низкие оптические потери как на длине волны 1.31 μm, так и при 1.55 μm (табл. 2).

Измерение спектральной зависимости оптических потерь ВС № 2, обладающего более низким уровнем оптических потерь, выявило наличие примесных групп ОН. Величина пика оптического поглощения на длине волны 1.38 μm, равная 2 dB/km (рис. 1), свидетельствует о содержании этой примеси менее 10⁻⁵ wt.%.

Результаты исследования примесного состава слоев заготовки рентгеновским микронзондовым анализом показали, что при одностадийном способе нанесения фторсиликатной оболочки (заготовка № 1) содержание в ней хлора достигает 0.08 at.%, а в сердцевине не превышает 0.05 at.%. В заготовке № 2 при двухстадийном процессе формирования такой оболочки концентрация хлора как в оболочке, так и в сердцевине не превышает 0.02 at.%.

Результаты измерения РНП ВС (рис. 2) показали, что введение даже малой добавки GeO₂ в сердцевину приводит к резкому снижению радиационной стойкости. Оказалось, что в отличие от многомодовых германосиликатных ВС [7] радиационная стойкость одномодовых оптических волокон существенно хуже, чем у фторсиликатных, а наличие примесного хлора не способствует их радиационной стойкости как в случае многомодовых ВС [11]. Здесь тем не менее следует отметить, что радиационная стойкость одномодовых ВС с германосиликатной сердцевиной существенно зависит

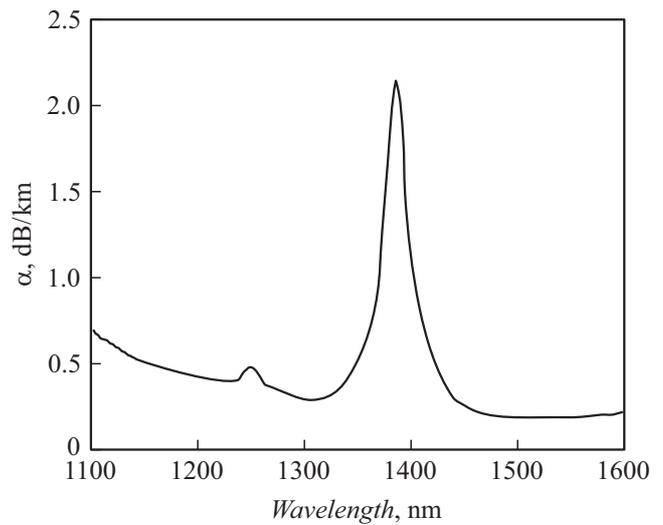


Рис. 1. Спектральная зависимость оптических потерь (α) для РСВС № 2.

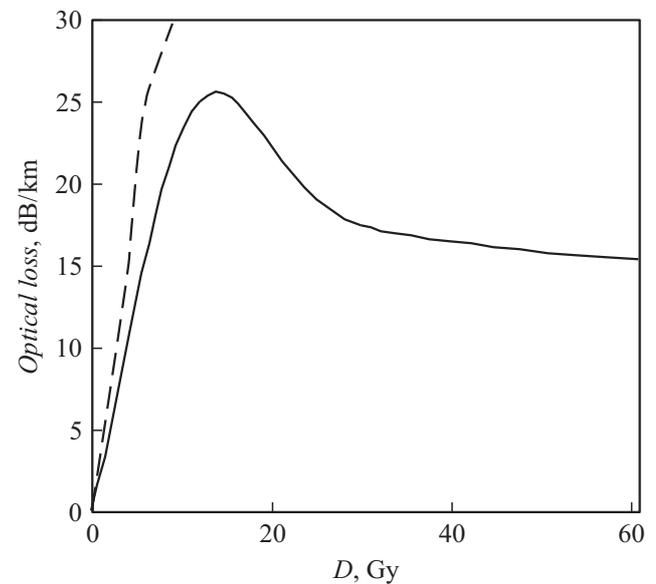


Рис. 2. Зависимость РНП (RIA) от дозы облучения (D) для РСВС № 1 (штриховая линия) и № 2 (сплошная линия).

от типа отражающей оболочки. Так, использование фторсиликатной оболочки для таких световодов приводит к снижению РНП по сравнению с оболочкой из чистого кварцевого стекла [19].

РСВС № 1, легированный GeO₂, в отличие от ВС № 2 увеличивает РНП с повышением дозы облучения (рис. 2). Это обусловлено, вероятно, большим содержанием примесного хлора [15], который может инициировать образование малоизученных радиационных центров окраски GeY и GeX.

Трехкратное снижение содержания германия в сердцевине ВС № 1 по сравнению с аналогом, содержащим 3.2 mol.% GeO₂ [20] не оправдало надежды на

Таблица 2. Параметры РСВС

ВС	λ _v , μm	α, dB/km, λ = 1.31 μm	α, dB/km, λ = 1.55 μm
№ 1	1.20	0.48	0.25
№ 2	1.16	0.3	0.18
Draka	≤ 1.26	≤ 0.4	≤ 0.3

повышение радиационной стойкости одномодовых ВС. Высокий уровень их РНП по сравнению с многомодовыми германосиликатными ВС [7] обусловлен, вероятно, дефицитом кислорода, возникающем в процессе высокотемпературного сжатия заготовки [16].

Малым содержанием хлора в РСВС № 2 обусловлены две особенности поведения РНП (рис. 2, 3), отмеченные в работе [21]:

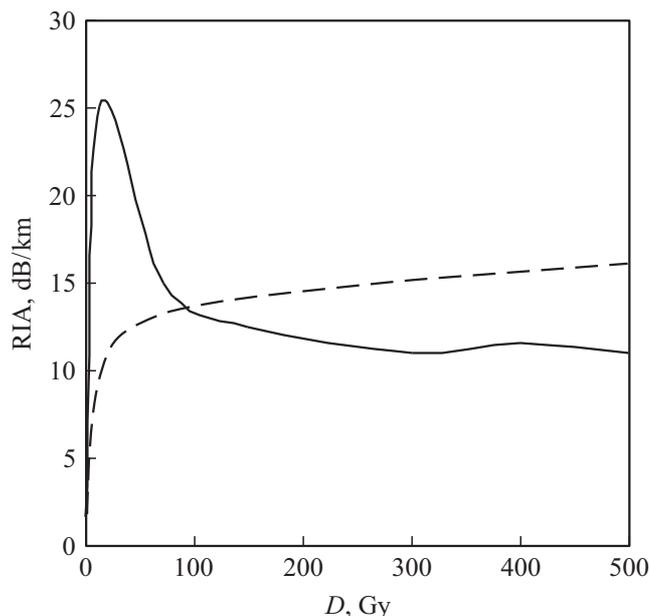


Рис. 3. Зависимость РНП (RIA) от дозы облучения (D) для РСВС № 2 (сплошная линия) и ВС фирмы „Draka“ (штриховая линия).

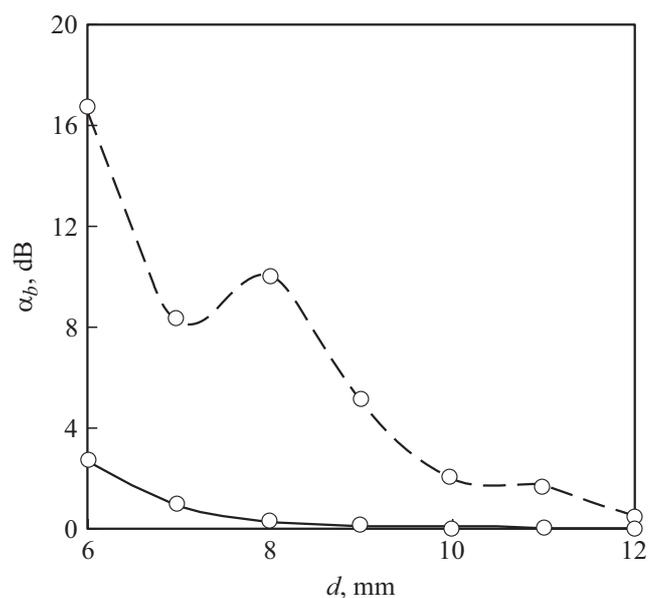


Рис. 4. Влияние диаметра (d) изгиба волокна на оптические потери (α_b) при длине волны излучения $1.31 \mu\text{m}$ для РСВС № 2 (сплошная линия) и SMF-28 (штриховая линия).

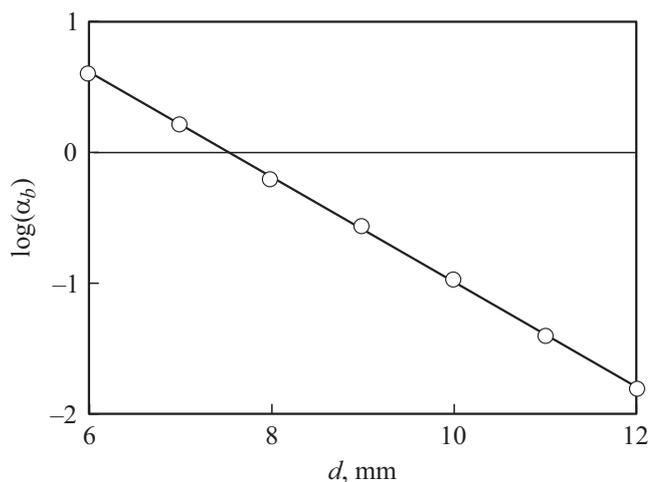


Рис. 5. Линейная аппроксимация экспериментальных данных (рис. 4) по влиянию изгиба волокна на оптические потери (α_b , dB) для РСВС № 2.

- резкое увеличение РНП до дозы гамма облучения $\approx 100 \text{ Gy}$ и последующий спад;
- практически постоянный уровень РНП в процессе последующего гамма облучения в диапазоне доз = 100–500 Gy.

Сопоставление характера изменения РНП с дозой облучения РСВС № 2 и аналогичного РСВС фирмы „Draka“ (рис. 3) может свидетельствовать о более низком уровне содержания примесного хлора в наших ВС.

Исследование устойчивости к изгибу проводили только для более перспективных по радиационной стойкости РСВС № 2 в сравнении с широко распространенным коммерческим одномодовым ВС типа SMF-28. Результаты измерений показали (рис. 4), что на длине волны $1.31 \mu\text{m}$ РСВС № 2 в отличие от световода SMF-28 имеют монотонную зависимость изменения оптических потерь от диаметра изгиба и обеспечивают существенно более высокий уровень устойчивости к изгибу благодаря повышенному значению Δn_c .

Экспериментальные данные для РСВС № 2 в координатах $\log(\alpha_b) - d$ (рис. 5; \log — десятичный логарифм) представляют линейную зависимость: $\log(\alpha_b) = 4.5 - 0.375d$.

Представленное уравнение дает возможность оценить оптические потери нашего РСВС при намотке на катушки малого диаметра. Так, 100 витков такого ВС на диаметре 25 mm приведет к увеличению оптических потерь на 0.0027 dB.

Заключение

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что для германосиликатных одномодовых ВС в отличие от опубликованных данных для многомодовых, изготавливаемых MCVD-методом, ионизирующее

излучение приводит к существенно более высокому уровню РНП. Введение в сердцевину из чистого кварцевого стекла фторсиликатных одномодовых ВС даже малых количеств GeO_2 (не более 1 mol.%) изменяет как количественно, так и качественно динамику роста РНП, увеличивающихся монотонно с дозой облучения. Экспериментальные образцы одномодовых фторсиликатных ВС W-типа с сердцевиной из кварцевого стекла, содержащего примесь ОН групп $\leq 10^{-5}$ wt.%, обладают высоким уровнем оптической устойчивости как при радиационном воздействии, так и при изгибе волокна.

Благодарности

Авторы выражают признательность начальнику отдела АО „НПО ГОИ им. С.И. Вавилова“ Демидову В.В. за измерения радиального профиля показателя преломления заготовок и сотрудникам АО „Концерн „ЦНИИ „Электроприбор“ Литуненко Е.Г. и Старцевой А.В. за исследования световодов методами электронной микроскопии.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S.R. Nagel, J.B. MacChesney, K.L. Walker. *IEEE J. Quant. Electron.*, **18** (4), 459 (1982).
- [2] В.А. Аксенов, В.В. Волошин, И.Л. Воробьев, И.И. Долгов, Г.А. Иванов, В.А. Исаев, А.О. Колосовский, С.К. Моршнев, Ю.К. Чаморовский, М.Я. Яковлев. *Радиотехника*, **12**, 51 (2005).
- [3] A.L. Tomashuk, M.Yu. Salgansky, P.F. Kashaykin, V.F. Khopin, A.I. Sultangulova, K.N. Nishchev, S.E. Borisovsky, A.N. Guryanov, E.M.J. Dianov. *Lightw. Technol.*, **32** (2), 213 (2014).
- [4] А.Н. Гурьянов, М.Ю. Салганский, В.Ф. Хопин, А.Ф. Косолапов, С.Л. Семенов. *Неорганические материалы*, **45** (7), 881 (2009). [A.N. Guryanov, M.Yu. Salganskii, V.F. Khopin, A.F. Kosolapov, S.L. Semenov. *Inorg. Mater.* **45** (7), 823 (2009). DOI:10.1134/S0020168509070218]
- [5] L.G. Cohen, D.M. Marcuse, W.L. Mammel. *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-18** (10), 1467 (1982).
- [6] S.R. Nagel. *J. Lightw. Technol.* **TL-2** (6), 213 (1984).
- [7] K. Sanada, T. Shamoto, K.J. Inada. *Non-Cryst. Solids*, **189**, 283 (1995).
- [8] S. Girard, J. Keurinck, A. Boukenter, J.-P. Meunier, J. Ouerdane, B. Azais, P. Charre, M. Vie. *Nucl. Instrum. Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **215** (1-2), 187 (2004).
- [9] J. Bisutti, S. Girard, J. Baggio. *J. Non-Cryst. Solids*, **353**, 461 (2007).
- [10] K. Nagasawa, M. Tanabe, K. Yahagi. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **23**, 1608 (1984).
- [11] S. Shibata, M. Nakahara. *J. Lightw. Technol.*, **LT-3** (4), 860 (1985).
- [12] K. Aikawa, K. Izoe, N. Shamoto, M. Kudoh, T. Tsumanuma. *Fujikura Tech. Rev.*, **37**, 9 (2008).
- [13] Электронный ресурс. Режим доступа: www.draka.com/communications.com
- [14] P.F. Kashaykin, A.L. Tomashuk, M.Yu. Salgansky, A.N. Abramov, R.N. Nishchev, A.N. Guryanov, E.M.J. Dianov. *Lightw. Technol.*, **33** (9), 1788 (2015).
- [15] Д.А. Дворецкий, В.А. Лазарев, А.Б. Пнев, В.Е. Карасик, М.Ю. Салганский, П.Ф. Кашайкин, В.Ф. Хопин, А.Н. Гурьянов, Е.М. Дианов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, **5**, 111 (2016). DOI: 10.18698/0236-3933-2016-5-111-124
- [16] А.Н. Гурьянов, Е.М. Дианов, С.В. Лаврищев, С.М. Мазавин, В.М. Машинский, В.Б. Неуструев, Н.И. Соколов, В.Ф. Хопин. *Физика и химия стекла*, **12** (3), 359 (1986).
- [17] A.T. Andreev, A.B. Grudin, E.M. Dianov, A.M. Prokhorov, A.N. Guryanov, G.G. Devjatykh, S.V. Ignatjev, V.F. Hopin. *Electron. Lett.*, **17** (12), 416 (1981).
- [18] P. Wang, Q. Wang, G. Farrell. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, **49** (9), 2133 (2007).
- [19] S. Ju, P.R. Watekar, Y.-T. Ryu, Y. Lee, S.G. Kang, Y. Kim, K. Lingann, Y.H. Kim, W.-T. Han. *Fiber Integrated Opt.*, **38** (4), 191 (2019). DOI: 10.1080/01468030.2019.1598520
- [20] П.Ф. Кашайкин, А.Л. Томашук, М.Ю. Салганский, И.С. Азанова, М.К. Цибиногина, Т.В. Димакова, А.Н. Гурьянов, Е.М. Дианов. *ЖТФ*, **89** (5), 752 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.05.47480.123-18
- [21] A.L. Tomashuk, E.M. Dianov, K.M. Golant, R.R. Khrapko, D.E. Spinov. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **45** (3), 1566 (1998).