

Исследование работы волоконно-оптической линии связи при экстремально низком температурном режиме

В.Г. Нестеров^{1,*}, В.В. Давыдов^{1,2,†}, В.В. Наумова^{2‡}

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, факультет инфокоммуникационных сетей и систем, кафедра фотоники и линий связи
Россия, 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков д.22, к. 1

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, институт электроники и телекоммуникаций, высшая школа прикладной физики и космических технологий
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(Поступила в редакцию 18.06.2024; подписана в печать 14.11.2024)

Обоснована необходимость проведения дополнительных исследований механических и оптических характеристик оптических волокон с сердцевинной, легированной оксидом германия GeO_2 с различной концентрацией, для оценки их работоспособности и деградации в экстремально низком температурном режиме эксплуатации. Разработана экспериментальная установка для проведения исследования изменения оптических потерь в волокнах при различных температурных режимах и радиусах изгибах, которые могут быть при их прокладке и изготовлении оптических датчиков в форме катушек. Установлено, что с увеличением степени легирования сердцевинной оптического волокна оксидом германия граница резкого увеличения оптических потерь при низких температурах смещается в сторону нуля. Отмечено, что использование модели разрушения для оптических волокон с сердцевинной из чистого кварца и легированной оксидом германия позволило оценить их механические свойства, чтобы обеспечить передачу информации на трассе и измерения с использованием оптических датчиков при низких температурах. Полученные новые данные позволяют разработчикам волоконно-оптических линий связи и оптических датчиков разработать оптимальные конструкции данных устройств с учетом климатических условий их эксплуатации, а также возможностей технологий MCVD и VAD, применяемых для изготовления оптических волокон.

PACS: 42.81.Cn

УДК: 535-016

Ключевые слова: модифицированный метод парофазного осаждения (MCVD), метод аксиального осаждения (VAD), специальные германо-силикатные волокна, сердцевина, экстремально низкий температурный режим, коэффициент рэлеевского рассеяния.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) для передачи больших объемов информации на большие расстояния предъявляет жесткие требования к оптическим волокнам [1–4], которые сейчас активно применяются в дистанционных оптических датчиках для контроля различных физических величин. Основные эксплуатационные характеристики оптических волокон (оптические потери, числовая апертура, полоса пропускания, дисперсия, соотношение геометрических размеров сердцевинной и отражающей оболочки) в значительной мере зависят технологии изготовления волокна и особенностей производственного процесса.

Для изготовления оптических волокон из кварцевого стекла настоящее время применяется несколько методов, в которых используют высоко температурное парофазное осаждение с летучими соединениями исходных реагентов [5, 6]. Наиболее эффективными и применяемыми при производстве оптических волокон оказались методы парофазного осаждения в опорной кварцевой

трубе (MCVD) и аксиального осаждения (VAD) [7, 8]. В этих двух методах есть существенное различие, которое связано с тем, что заготовка, из которого изготавливается оптическое волокно с использованием MCVD ограничено размером установки и трубкой из кварцевого стекла. Поэтому, стержень не может быть сделан очень большим или длинным. Это приводит к тому, что этим методом изготавливаются волокна со строительной длиной до 15 км. При использовании VAD метода заготовка для производства волокна может быть очень большой длины, что позволяет изготавливать непрерывные волокна в 50 км и более.

Необходимо также отметить, что процесс вытяжки оптического волокна оказывает существенное влияние на многие его характеристики, что крайне важно учитывать при его эксплуатации. Особенно необходимо отметить, что вариации диаметра сердцевинной оптического волокна вызывают увеличение оптических потерь на рассеяние, а при соединении волокон, у которых есть даже небольшие различия в диаметрах сердцевинной, это может привести к возрастанию потерь [9–12].

В условиях изменения температурного режима, который сейчас наблюдается на многих трассах по причине ухудшения экологии и изменения климата [13–15] возникают сложности с эксплуатацией магистральных волоконно-оптических трасс. Кроме того, такая

* nesterov.vyacheslav7@gmail.com

† davydov_vadim66@mail.ru

‡ vika_025898@mail.ru

же проблема возникает при эксплуатации волоконно-оптических датчиков для дистанционного контроля различных параметров [16, 17]. С учетом того, что число трасс и систем с оптическими датчиками становится все больше и больше, то постоянно предъявляются новые требования по их стоимости, сроку эксплуатации и протяженности передачи информации без оптических усилителей [18, 19]. Использование на трассах и в дистанционных оптических датчиках одномодовых германо-силикатных волокон потребовало проведения дополнительных исследований изменения оптических потерь от температуры, так как в ряде случаев необходимый температурный режим при их эксплуатации обеспечить достаточно сложно.

1. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

В настоящее время одномодовые магистральные волокна в основном изготавливаются с использованием двух методов (MCVD и VAD), которые необходимо рассмотреть, чтобы в дальнейшем обобщить результаты исследований.

Технологии изготовления оптических волокон данными методами подробно рассмотрены в [7, 8]. Непосредственно для нашей работы необходимо выделить следующее.

Высокую концентрацию оксида германия в сердцевине можно обеспечить только с использованием метода MCVD. Кроме того, на протяжении всего процесса изготовления каждого слоя оптического волокна сохраняется закрытое пространство, что позволяет избежать появления в них примесей, влияющих на оптические потери.

В VAD методе все химические реакции происходят на открытой площади, что способствует более легкому доступу в слои оптического волокна при его производстве различных примесей. С другой стороны, прозрачная заготовка, используемая в методе VAD, не имеет внутреннего канала. Поэтому оксид германия (GeO_2), находящийся в сердцевине, не восстанавливается. В этом случае процесс изготовления волокна более дешевый чем при использовании метода MCVD, при этом оптические потери в таких волокнах меньше.

Исследуемые волокна были изготовлены по специальному заказу в НПО «Волокно» для решения ряда задач. Все волокна были изготовлены под стандарт G.652 (диаметр сердцевины 9 мкм, оболочки 125 мкм). Волокно одномодовое. Коммерчески доступными являются одномодовые волокна с сердцевиной из чистого кварца, и сердцевиной, легированной оксидом германия с концентрацией 3.5 и 5 %, например производитель фирма Corning — тип SMF-28 (производство в Индии). Мы для экспериментов взяли все волокна из одной партии от одного производителя НПО «Волокно» (также можно по специальному заказу получить аналогичное одномодовые волокна в ЦНИИ Электро-

прибор). Это связано с тем, что при разных технологиях у разных производителей есть различия в волокнах (разная температура застывания и прочие). Это приведет к дополнительному разбросу результатов при экспериментах, особенно при высокой степени легирования сердцевины волокна оксидом германия.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО

На магистральных трассах в различных ситуациях используются оптические волокна изготовленные VAD-методом с различной степенью легирования оксидом германия с оптическими потерями от 0.224 дБ/км до 0.51 дБ/км на длине волны 1.55 мкм. В то же время высоколегированные одномодовые оптические волокна, изготовленные MCVD-методом на длине волны 1.55 мкм обладают более высокими оптическими потерями от 0.4 дБ/км до 3 дБ/км. Причины такого большого различия в уровне оптических потерь в оптических волокнах, изготовленных при использовании двух принципиально похожих методов, до последнего времени так и неясны. При этом данные волокна более устойчивы к низким температурам и радиационному воздействию, что может объясняться технологией их изготовления.

В VAD-методе осаждение слоев происходит почти перпендикулярно оси заготовки. Уровень легирования в этом методе в значительной степени определяется распределением температуры по фронту осаждения, который обычно имеет выпуклую в сторону горелки форму. Поэтому температура фронта осаждения в VAD-методе уменьшается к периферии заготовки, и профиль показателя преломления автоматически принимает градиентную форму. Осаждение отражающей оболочки в VAD методе производится с помощью дополнительной горелки, в пламени которой происходит гидролиз высокочистых хлоридов исходных веществ. Таким образом, заготовки, изготовленные VAD-методом, целиком состоят из высокочистого кварцевого стекла, причем отражающая оболочка может быть легирована, например, фтором. В MCVD методе осаждение слоев производится на внутреннюю поверхность опорной трубы. Уровень легирования в каждом слое определяется, в первую очередь, составом исходной паргазовой смеси. Около 95% заготовки одномодового волокна состоит из материала опорной трубы. До недавнего времени лучшие опорные кварцевые трубы Heralux WG (фирма Heraeus, ФРГ) изготавливались из природного кварцевого сырья.

Для изготовления одномодового волокна с градиентным профилем показателя преломления (ППП) требуется нанести в 4–5 раз больше слоев сердцевины, а, следовательно, и отражающей оболочки, что увеличивает оптические потери. Поэтому в нашей работе было принято решение для снижения уровня оп-

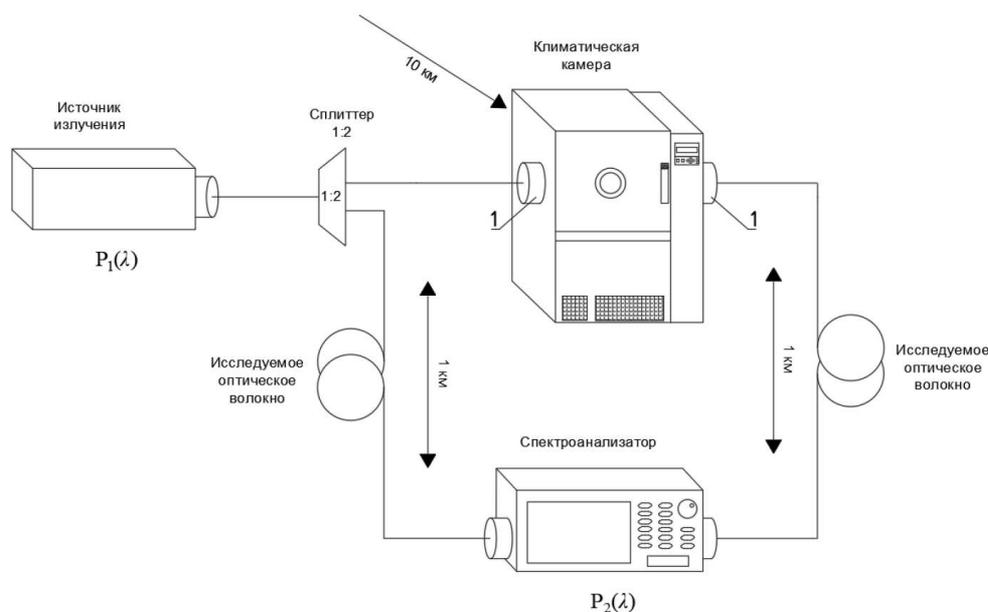


Рис. 1. Принципиальная схема для измерения зависимости оптических потерь на длине волны 1.55 мкм от температуры T : 1 — термовыводы

тических потерь на линиях и конструкциях датчиков, в которых используются высоколегированные одномодовые оптические волокна, применять волокна со ступенчатым ППП. Исследования показывают, что даже незначительное изменение ступенчатого ППП на градиентный приводит к существенному снижению оптических потерь.

Проведенные нами оценки показывают, что небольшое уменьшение средней концентрации оксида германия в сердцевине градиентного волокна по сравнению со ступенчатым не приводит к заметному уменьшению величины оптических потерь, обусловленных фундаментальными механизмами. Источником аномального рассеяния в оптическом волокне со ступенчатым ППП являются вариации границы сердцевина-оболочка, возникающие в процессе вытяжки волокна. Создание градиентного ППП сглаживает скачок вязкости расплавленного в процессе вытяжки оптического волокна стекла, в результате чего происходит снижение оптических потерь, вызванных аномальным рассеянием. Отличительной особенностью ППП волокна, изготовленных MCVD-методом, является наличие центрального провала. Центральный провал представляет собой область сердцевины с пониженным содержанием легирующего оксида в результате его испарения в процессе схлопывания заготовки. Поскольку легирование кварцевого стекла оксидами германия или фосфора приводит к снижению его вязкости, область центрального провала имеет более высокую вязкость по сравнению с окружающей ее сердцевиной. В процессе вытяжки оптического волокна область центрального провала может изменять свою форму и пространственное расположение. Все это скажется при изменениях

температуры в отрицательную область.

С учетом построенной нами модели по изменению оптических потерь при изменениях температуры T , в которых будет находиться оптическое волокно длительное время, была для проведения исследований разработана экспериментальная установка (рис. 1), в термокамере которой размещалась бухта волокна длиной 10 км.

Для обеспечения высокой точности измерения оптических потерь, которая необходима при изменении значения T в окрестности нуля и минусовых температур до 20°C , в экспериментальной установке предложено оригинальное решение с использованием двух каналов измерения мощности оптического сигнала. Использование двух каналов в отличие от классических экспериментальных установок по исследованию влияния температуры на оптические потери также необходимо при работе на высоких температурах и для калибровки, связанной с изменением температурного градиента при выходе волокна из термокамеры.

Уровень входной мощности в оптическое волокно от источника излучения $P_1(\lambda)$ равен 10 мВт. Выбор приемника для регистрации оптического излучения был сделан в пользу спектроанализатора Yokogawa AQ6370D-22-L1-F/FC/RFC (Япония), климатическая камера тепло-холод Espes MC-812R (Япония). Первоначально измеряется уровень мощности $P_2(\lambda)$ оптического излучения, прошедшего по первому каналу (без термокамеры) от источника излучения к приемнику по волокну длиной 1 км.

Далее, осуществляют измерение уровня мощности $P_2(\lambda)$ оптического сигнала поступившего от источника излучения к приемнику через бухту длиной 10 км,

уложенную в климатической камере и оптическому волокну длиной 1 км вне зоны камеры. Соединительных разъемов в двух каналах одинаковое число, что позволит при необходимости выполнить калибровку.

Оптические потери $\alpha(\lambda)$ в такой конструкции экспериментальной установки рассчитываются по формуле (1):

$$\alpha(\lambda) = -10 \frac{\log(P_2(\lambda)/P_1(\lambda))}{L}, \quad (1)$$

где L — длина оптического волокна, на котором вычисляются оптические потери (по построению экспериментальной установки $L = 10$ км).

На этой установке были проведены измерения волокон, произведенных VAD-методом с градиентным профилем показателя преломления (ППП), с кварцевой сердцевиной, а также с сердцевинами, которые легированы GeO_2 в разных концентрациях. На рис. 2 представлены результаты этих исследований.

Проведенные исследования позволили нам получить ряд новых данных. При увеличении степени (концентрации) легирования (от 3.5–30 мол.% GeO_2) сердцевины оптического волокна оптические потери возрастают при нулевой температуре примерно в 2.5 раза для случая перехода при использовании оптического волокна с сердцевиной из чистого кварца к волокну с сердцевиной с концентрацией GeO_2 порядка 30% (при увеличении концентрации германия в сердцевине оптического волокна возрастает погрешность определения её значения). Для температуры $T = -80^\circ\text{C}$ данная разница увеличивается до 9 раз.

Отдельно стоит отметить, что анализ зависимостей, представленных на рис. 2, позволяет сделать вывод, что заметное увеличение оптических потерь при уменьшении T возникает при степени легирования оптического волокна свыше 10 мол.% GeO_2 . Оптические потери в одномодовом оптическом волокне с сердцевиной из чистого кварца практически не изменяются с уменьшением значения T .

Кроме того, для всех исследуемых оптических волокон установлено, что до $T = -15^\circ\text{C}$ оптические потери изменяются незначительно. Это означает, что при проектировании линии связи и конструкции оптического датчика с волокном нет необходимости в дополнительной термостабилизации канала, в котором размещено волокно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования коэффициентов рэлеевского рассеяния в одномодовых оптических волокнах при различных концентрациях легирования (от 3.5–30 мол.% GeO_2) их сердцевины, показали ряд новых результатов, которые необходимо учитывать при разработке трассы и волоконно-оптических датчиков, а так-

же расчета их бюджета и выборе типа оптического волокна.

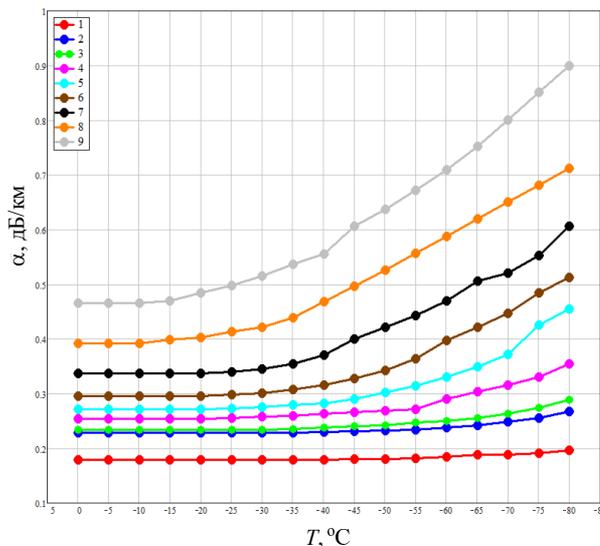


Рис. 2. Зависимость оптических потерь на длине волны 1.55 мкм от температуры; VAD-метод, градиентный PPP; 1 — оболочка из желтого кварцевого стекла; 2 — сердцевина легирована 3.5% GeO_2 ; 3 — сердцевина легирована 5% GeO_2 ; 4 — сердцевина легирована 10% GeO_2 ; 5 — сердцевина легирована 12.5% GeO_2 ; 6 — сердцевина легирована 15% GeO_2 ; 7 — сердцевина легирована 20% GeO_2 ; 8 — сердцевина легирована 25% GeO_2 ; 9 — сердцевина легирована 30% GeO_2

Установлено, что причиной высокого уровня оптических потерь в высоколегированных оптических волокнах при уменьшении температуры являются дополнительные потери, локализованные в области границы сердцевина-оболочка и в области центрального провала PPP.

По результатам исследований сделано предположение, что оптические потери высоколегированных одномодовых оптических волокнах обусловлены суммарным вкладом оптических потерь за счет фундаментальных механизмов и оптических потерь на аномальное рассеяние. Аномального рассеяния, заключающийся в рассеянии света на вариациях границы сердцевина — оболочка, связанного с размером и положением центрального провала PPP с уменьшением температуры T увеличивается возможно по причине неоднородностей при легировании в процессе перетяжки заготовки в волокно.

Полученные новые данные позволяют по-новому подойти к изготовлению оптических волокон с различной степенью легирования для использования их в различных условиях с учетом стоимости.

Материалы докладывались на Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2024»

- [1] *Popovskiy N.* // Proceedings of the 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElCon 2024. 741 2024.
- [2] *Isaenko D., Reznikov B., Rodin S.* et al. // Proceedings of the 2022 International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech 2022. 315 2022.
- [3] *Reznikov B., Rodin S., Popovskiy N.* et al. // Proceedings of the 2022 International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech 2022. 158 2022.
- [4] *Davydov V., Reznikov B., Dudkin V.* // *Energies*. **16**, N 3. 1040 (2023).
- [5] *Dianov E.M., Mashinsky V.M., Neustruev V.B.* et al. // *Optical Fiber Technol.* **3**. 77 (1997).
- [6] *Davey S.T., Williams D.L., Spirit D.M., Ainslie B.J.* // *Proc. SPIE*. **1** **171**. 181 (1989).
- [7] *Potkay E., Clark H.R., Smyth I.P.* et al. // *J. Lightwave Technol.* **6**. 1338 (1988).
- [8] *Девятых Г.Г., Гурьянов А. Н.* // *Высококачественные вещества*. № 4. 18 (1990).
- [9] *Ainslie B.J., Beales K.J., Day C.R., Rush J.D.* // *IEEE J. Quantum Electron.* **18**. 514 (1982).
- [10] *Ainslie B.J., Beales K.J., Cooper D.M., Day C.R.* // *Proc. SPIE*. **425**. 15 (1983).
- [11] *Moroz A.V., Davydov V.V.* // *Journal of Physics: Conference Series*. **1410**, N 1. 012212 (2019).
- [12] *Fadeenko V.B., Pchelkin G.A., Davydov V.V.* et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. **1410**, N 1. 012238. (2019).
- [13] *Podstrigaev A.S., Lukyanov A.S., Smolyakov A.V.* et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. **1410**, N 1. 012155 (2019).
- [14] *Dmitrieva D.S., Pilipova V.M., Davydov R.V.* et al. // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. **12526 LNCS**. 348 (2020).
- [15] *Davydov V.V., Myazin N.S., Grebenikova N.M., Dudkin V.I.* // *Measurement Techniques*. **62**, N 12. 1090 (2020).
- [16] *Dmitrieva D.S., Pilipova V.M., Dudkin V.I.* et al. // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. **13158 LNCS**. 230 (2022).
- [17] *Esposito F., Stancalie A., Srivastava A.* et al. // *J. Light. Technol.* **41**. 4389 (2023).
- [18] *Filatova S.A., Fale A.E., Kamynin V.A.* et al. // *Journal of Lightwave Technology*. **41**, N 19. 6400 (2023).
- [19] *Поповский Н.И., Давыдов В.В.* // *Электросвязь*. № 5. 27 (2023).

Investigation of the operation of a fiber-optic communication line at extremely low temperature conditions

V.G. Nesterov^{1,a}, V.V. Davydov^{1,2,b}, V.V. Naumova^{2,c}

¹*St. Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. M. A. Bonch-Bruевич, Faculty of Information and Communication Networks and Systems, Department of Photonics and Communication Lines*

St. Petersburg, 193232, Russia

²*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Electronics and Telecommunications, Higher School of Applied Physics and Space Technologies*

St. Petersburg, 195251, Russia

E-mail: ^anesterov.vyacheslav7@gmail.com, ^bdavydov_vadim66@mail.ru, ^cvika_025898@mail.ru

The necessity of additional research of mechanical and optical characteristics, assessment of operability and degradation of special optical fibers with a core doped with GeO₂ in extremely low temperature operation is justified. The application of a model for the destruction of optical fibers is considered, which makes it possible to evaluate the mechanical properties of quartz fibers with a core of pure quartz and doped with germanium oxide. An experimental setup has been developed and research has been conducted. It has been found that with an increase in the degree of doping of the optical fiber core with germanium oxide, the limit of the increase in optical losses at low temperatures shifts towards zero. This creates restrictions on the use of doped core fibers when operating on highways. The obtained data allow the developers of fiber-optic communication lines, taking into account climatic conditions, to develop an optimal design of the main communication line, taking into account the MSVD and VAD manufacturing of optical fibers.

PACS: 42.81.Cn

Keywords: modified vapor phase deposition (MCVD) method, axial deposition (VAD) method, special germanosilicate fibers, extremely low temperature regime, Rayleigh scattering coefficient.

Received 18 June 2024.

Сведения об авторах

1. Нестеров Вячеслав Геннадьевич — студент; e-mail: nesterov.vyacheslav7@gmail.com.
2. Давыдов Вадим Владимирович — доктор физ.-мат. наук, профессор; e-mail: davydov_vadim66@mail.ru.
3. Наумова Виктория Викторовна — магистрант 2 года обучения; e-mail: vika_025898@mail.ru.