

09.5

## Исследование разогрева кварцевых волоконных световодов с металлической спиралью проходящим по сердцевине лазерным излучением

© И.О. Храмов, О.А. Рябушкин

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская обл., Россия

E-mail: oxaxivan@yandex.ru

Поступило в Редакцию 18 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 13 мая 2023 г.

Принято к публикации 19 мая 2023 г.

Исследованы термооптические свойства пассивных кварцевых световодов с металлической спиралью, нанесенной на их боковую полимерную поверхность. Показано, что разогрев таких оптических волокон проходящим лазерным излучением вследствие микроизгибных потерь вызывает изменение их температуры и электрического сопротивления металлической спирали. На основании этого предложен простой метод измерения и контроля мощности выходного излучения волоконных лазеров в режиме реального времени.

**Ключевые слова:** волоконные лазеры, оптические волокна, микроизгибные потери, волокна с металлической спиралью, измерение оптической мощности.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.14.55823.19601

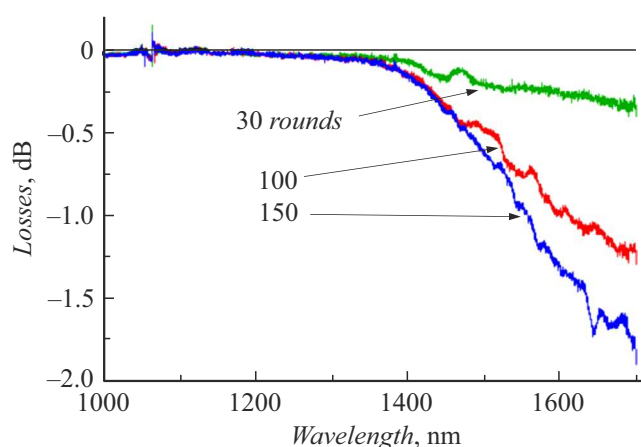
Выходная оптическая мощность непрерывных волоконных лазеров на данный момент может достигать сотен киловатт для многомодового пучка лазерного излучения [1] и десятков киловатт для одномодового [2]. Существуют различные способы измерения мощности лазерного излучения мультикиловаттного уровня, но наиболее широко используются тепловые детекторы. Однако такие методы неприменимы для непрерывного контроля мощности в режиме реального времени, который необходим во многих лазерных технологиях промышленных приложений. Отведение доли излучения делителями пучка для последующего измерения в свою очередь приводит к ухудшению качества основного пучка [3] и неконтролируемым потерям мощности.

Не обладающие описанным выше недостатком ponderomotorные методы [4] сложны в реализации, а методы, основанные на измерении рассеянного в волоконно-оптических устройствах излучения [5], не подходят для измерения высокой мощности излучения ввиду тепловых и термооптических эффектов в оптических волокнах.

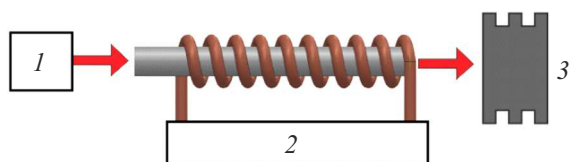
Ранее мы предложили метод измерения мощности излучения [6], проходящего по волоконному тракту, основанный на включении в него сенсорного волоконного световода с металлическим покрытием. Такой метод подходит для непрерывного измерения оптической мощности излучения лазеров, однако имеет ограничения из-за необходимости точного подбора волноводных параметров и встраивания сенсорного волокна в волоконный тракт, а также из-за ухудшения механических и оптических свойств стекла в таких сенсорных волокнах вследствие диффузии металла внутрь кварцевого стекла при их покрытии слоем металла.

В настоящей работе использовались традиционные оптические волокна с полимерным покрытием с намотанной на него внешней металлической спиралью для измерения мощности излучения волоконных лазеров. Медная проволока длиной 50–70 см вручную плотно наматывалась спиралью на выходное оптическое волокно источника лазерного излучения. Диаметр проволоки 100  $\mu\text{m}$ , шаг намотки 0.5–1 mm.

Кроме типичных для оптических волокон механизмов потерь излучения в волокнах данного типа присутствуют также потери на изгибах, вызванных намоткой [7]. Они зависят от величины изгибов и, следовательно, от натяжения намотки. Типичный спектр для волокон с радиусом жилы  $a = 12 \mu\text{m}$  приведен на рис. 1. Излучение,



**Рис. 1.** Спектр микроизгибных потерь в SM-волокне с металлической намоткой с 30, 100 и 150 витками. Особенности в области 1070 nm вызваны нестабильностью спектра излучения источника.



**Рис. 2.** Блок-схема экспериментальной установки. 1 — лазерный источник, 2 — миллиметр, 3 — тепловой измеритель мощности для контроля проходящего излучения.

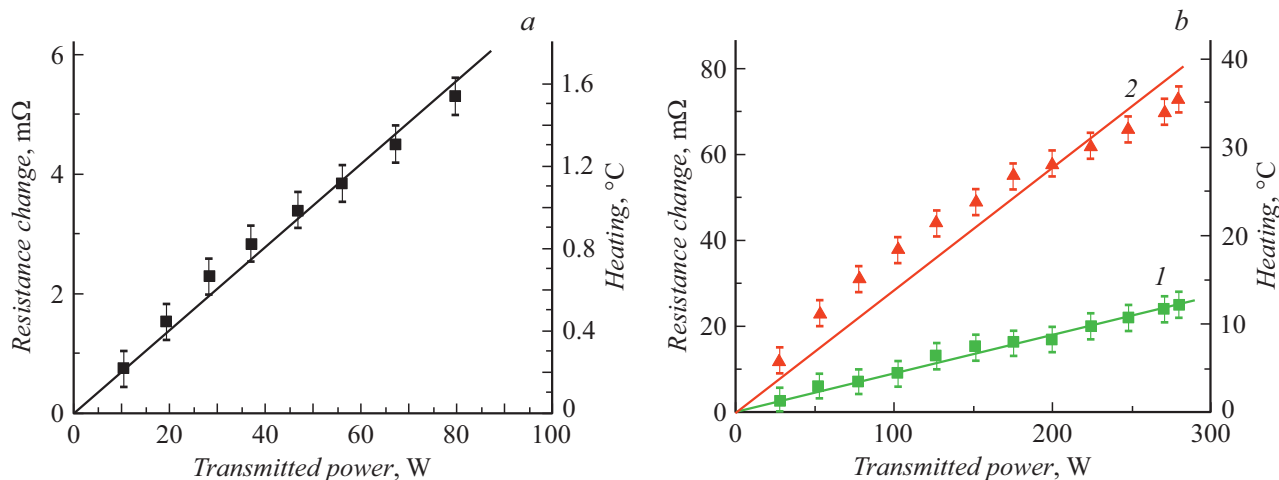
высветившееся в области микроизгиба, попадает в кварцевую оболочку, а затем, поскольку общее поглощение в полимерной оболочке толщиной  $125\ \mu\text{m}$  составляет менее  $0.3\%$  [8], высвечивается из волокна и поглощается металлической намоткой, что вызывает ее разогрев.

Для исследования описанного эффекта мы определили температуру волокон с металлической намоткой путем измерения с использованием миллиметра ее электрического сопротивления  $R$ , которое в условиях эксперимента линейно зависит от температуры:

$$R = R_0(1 + \alpha_t \Delta T (\Delta l / l)).$$

Здесь  $\alpha_t$  — коэффициент температурного сопротивления металла,  $\Delta T$  — разогрев спирали,  $l$  и  $\Delta l$  — длина всей металлической проволоки и ее части, использованной для намотки, соответственно.

Для исследования многомодовых (ММ,  $a = 300\ \mu\text{m}$ ,  $\text{NA} = 0.22$ ) волокон в качестве лазерного источника применялись полупроводниковые лазерные диоды с центральной длиной волны излучения  $975\ \text{nm}$  с волоконным объединителем. Для исследования одномодовых (SM,  $a = 12\ \mu\text{m}$ ) волокон использовался волоконный лазер с непрерывным выходным излучением мощностью до  $200\ \text{W}$ , со случайной поляризацией и центральной длиной волны излучения  $1064\ \text{nm}$ . Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 2.



**Рис. 3.** Зависимости электрического сопротивления спирали и ее разогрева от пропускаемой мощности в SM-волокне с покрытой углеродом спиралью (a) и в ММ-волокне (1 — непокрытая, 2 — покрытая углеродом спираль) (b). Отклонение от линейной зависимости, вероятно, связано с отклонением от закона Ньютона–Рихмана из-за сильного разогрева волокна.

Для определения вклада различных механизмов потерь были проведены эксперименты с проволокой, покрытой тонким слоем углерода, который увеличивает коэффициент поглощения лазерного излучения, а также с проволокой без покрытия. Зависимость разогрева волокна от мощности проходящего по нему излучения показана на рис. 3.

Мы предполагаем, что затухание оптического излучения в оптическом волокне с металлической спиралью подчиняется закону Бугера  $P(z) = P_0 \exp(-\alpha z)$ . Анализ разогрева волокна позволяет определить коэффициент потерь излучения  $\alpha$ .

При микроизгибных потерях тепловая мощность выделяется в металлической спирали при поглощении ей высветившегося излучения. В общем случае пространственное распределение температуры в исследуемом волокне с металлической спиралью подчиняется нестационарному уравнению теплопроводности с граничными условиями, соответствующими конвективному теплообмену с окружающей средой (закон Ньютона–Рихмана) и теплообмену между волокном и намоткой.

Однако, полагая малым число Био для волокна с металлической спиралью, мы пренебрегаем распределением температуры внутри него, что позволяет описать разогрев балансным уравнением

$$P_{gener} = P_{dissip}.$$

Пусть  $P$  — пропускаемая оптическая мощность,  $N$  — количество витков намотки,  $D$  — диаметр медной проволоки,  $L$  — длина исследуемого участка волокна,  $R_t$  — тепловое сопротивление волокна (отношение температурного напора на границе волокно–воздух к тепловому потоку через нее), определенное по кинетике его охлаждения,  $\Delta T$  — разогрев волокна. В стационарных условиях мощность конвективного теплоотвода  $P_{dissip}$  равна выделяемой в металлической спирали тепловой мощности  $P_{gener}$ , которая зависит от мощности рассеян-

ного излучения ( $P\alpha L$ ) и от доли рассеянного излучения, попавшего на металлическую спираль и поглощенного ей ( $ND/L$ ). Таким образом, получим

$$P\alpha ND = \Delta T/R_t.$$

Отсюда коэффициент потерь излучения равен 0.45 и 0.7 dB/m для SM- и MM-волокон соответственно. Существенная разница по сравнению с традиционными оптическими волокнами обусловлена вкладом описанных выше микроизгибных потерь. Для SM-волокна потери 0.054 dB на 100 витков сравнимы с данными рис. 1 с учетом чувствительности оптического спектроанализатора и различия между разными намотками.

Полученные результаты показывают возможность измерения мощности выходного излучения волоконных лазеров без каких-либо искажений пучка или значительного снижения мощности, что позволяет проводить измерения в режиме реального времени в ходе промышленных операций.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-01110-23-01.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] E.A. Shcherbakov, V.V. Fomin, A.A. Abramov, A.A. Ferin, D.V. Mochalov, V.P. Gapontsev, in *Advanced Solid-State Lasers Congress*, ed. by G. Huber, P. Moulton (Optica Publishing Group, 2013), p. ATh4A.2. DOI: 10.1364/ASSL.2013.ATh4A.2
- [2] V.V. Fomin, A.A. Abramov, A.A. Ferin, D.V. Mochalov, N. Platonov, V.P. Gapontsev, in *5th Int. Symp. on high-power fiber lasers and their applications* (St. Petersburg, 2010), p. SyTu-1.3.
- [3] J.D. Mansell, J. Hennawi, E.K. Gustafson, M.M. Fejer, R.L. Byer, D. Clubley, S. Yoshida, D.H. Reitze, *Appl. Opt.*, **40** (3), 366 (2001). DOI: 10.1364/AO.40.000366
- [4] Н.Г. Кокодий, Р.А. Валитов, *Измерительная техника*, № 12, 27 (1969). [N.G. Kokodii, R.A. Valitov, *Meas. Tech.*, **12** (12), 1684 (1969). DOI: 10.1007/BF00979965].
- [5] P. Ji, S. Baek, C.-H. Park, S.-S. Lee, Y.-E. Im, Y. Choi, *Opt. Express*, **26** (12), 14972 (2018). DOI: 10.1364/OE.26.014972
- [6] I.O. Khramov, R.I. Shaidullin, O.A. Ryabushkin, *Opt. Eng.*, **58** (7), 072012 (2019). DOI: 10.1117/1.OE.58.7.072012
- [7] H. Taylor, *J. Light. Technol.*, **2** (5), 617 (1984). DOI: 10.1109/JLT.1984.1073659
- [8] R.I. Shaidullin, R.I. Ismagilova, O.A. Ryabushkin, *Opt. Mater. Express*, **9** (4), 1577 (2019). DOI: 10.1364/OME.9.001577