

УДК 681.7.068

**И.С. Азанова<sup>1,2</sup>, А.Д. Шевцова<sup>1,2</sup>, А.С. Вахрушев<sup>1</sup>,  
Д.И. Нурмухаметов<sup>1</sup>, Ю.О. Шаронова<sup>1</sup>,  
И.В. Петухов<sup>1,2</sup>, А.Б. Волынцев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь, Россия

<sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

## **ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАДИАЦИОННО-СТОЙКОГО АКТИВНОГО ЭРБИЕВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ**

Исследовано влияние уровня оптической мощности накачки на 980 нм на радиационно-наведенные оптические потери (РНП) на длине волны 1550 нм при воздействии непрерывного гамма-излучения и релаксации для активного радиационно-стойкого оптического волокна (АОВ) с сердцевинной из легированного эрбием и церием алюмогерманосиликатного стекла. Показано положительное влияние уровня оптической мощности на длине волны поглощения 980 нм на величину РНП как при облучении, так и при релаксации. Определены энергия активации и наблюдаемый порядок реакции для процесса релаксации РНП в исследуемых АОВ. Кроме того, выявлено затруднение релаксации РНП при температуре 60 °С по сравнению с релаксацией при комнатной температуре.

**Ключевые слова:** радиационно-наведенные потери, эрбиевые суперлюминесцентные волоконные источники оптического излучения, эрбиевое активное волокно, радиационная стойкость.

**I.S. Azanova<sup>1,2</sup>, A.D. Shevtsova<sup>1,2</sup>, A.S. Vakhrushev<sup>1</sup>,  
D.I. Nurmukhametov<sup>1</sup>, Yu. O. Sharonova<sup>1</sup>,  
I.V. Petuhov<sup>1,2</sup>, A.B. Volyntsev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Perm Scientific and Production Instrument Making Company,  
Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>Perm State National Research University, Perm, Russia

## **RECONSTRUCTION OF RADIATION-RESISTANT ACTIVE ERBIUM OPTICAL FIBER AFTER EXPOSURE TO CONTINUOUS GAMMA RADIATION**

The effect of the level of optical pump power at 980 nm on radiation-induced optical loss at a wavelength of 1550 nm under the influence of continuous gamma radiation and relaxation for an active radiation-resistant optical fiber with an erbium-doped core is investigated. and cerium alumogermanosilicate glass. A positive effect of the level of optical power at an absorption wavelength of 980 nm on the value of radiation-induced optical loss is shown both during irradiation and relaxation. The activation energy and the observed order of the reaction for the process of radiation-induced optical loss

relaxation in the studied AOB have been determined. In addition, it was revealed that the relaxation of the active radiation-resistant optical fiber at a temperature of 60 ° C is more difficult than relaxation at room temperature.

**Keywords:** radiation-induced attenuation, Erbium doped fiber, Erbium doped source, radiation effects.

## **Введение**

Эрбиевые суперлюминесцентные волоконные источники оптического излучения (ЭСВИОИ) считаются предпочтительными в качестве опорного сигнала для волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) навигационного класса точности, а также различных датчиков интерферометрического типа [1]. Активное оптическое волокно (АОВ) является наиболее чувствительным элементом ЭСВИОИ к воздействию ионизирующего излучения (ИИ).

При исследовании пассивных оптических волокон для определения уровня РНП в конце длительного срока эксплуатации в космосе (~ 10–15 лет) с экстремальной мощностью дозы примерно  $10^{-5}$  Гр/с нередко применяют экстраполяцию релаксации РНП на этот период времени после облучения с высокой мощностью дозы (~ 1 Гр/с) [2]. Это удобная методика, позволяющая снизить стоимость испытаний, поскольку длительность использования установки, моделирующей воздействие ИИ, существенно сокращается. Поэтому исследование процессов релаксации АОВ позволяет прогнозировать поведение в условиях космического пространства.

В АОВ при облучении так же, как и в пассивных волокнах, формируются центры окраски, вызывающие РНП и связанные со структурой кварцевого стекла и легирующими примесями, на скорость релаксации которых могут оказывать влияние эксплуатационные факторы, такие как уровень мощности накачки, температура окружающей среды. Поскольку АОВ имеют сложный состав легирующих примесей, то влияние эксплуатационных факторов на РНП для каждой группы АОВ индивидуально.

Целью данной работы является оценка влияния уровня оптической мощности накачки АОВ на длине волны 980 нм, а также температуры окружающей среды на восстановление генерационных свойств радиационно-стойкого с сердцевиной из легированного эрбием и церием алюмогерманосиликатного стекла АОВ после воздействия непрерывного гамма-излучения.

## 1. Образцы и методика эксперимента

Исследование проводилось на вытянутых из одной заготовки образцах АОВ с сердцевинной из легированного эрбием и церием алюмогерманосиликатного стекла (уровень поглощения на 980 нм примерно 14 дБ/м). Данное волокно по генерационным характеристикам сравнимо с зарубежным аналогом [3].

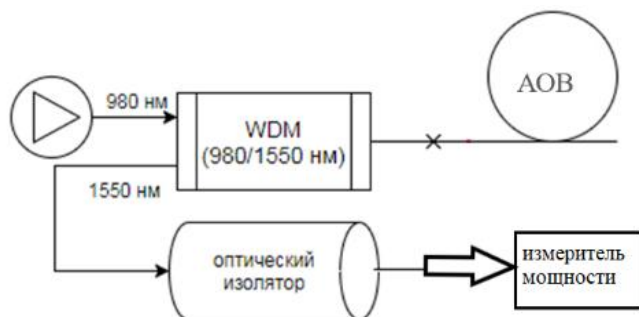


Рис. 1. Принципиальная схема ЭСВИОИ

АОВ исследовалось в схеме однопроходного ЭСВИОИ с встречной накачкой (рис. 1). Для исключения влияния пассивных оптических компонентов и управляющей электроники на результаты опытов любым воздействиям подвергалось только АОВ. Образцы АОВ находились в виде свободной намотки диаметром 70 мм.

Облучение проводилось при комнатной температуре с использованием установки ГУТ200М на основе изотопа  $^{60}\text{Co}$  с мощностью дозы 102 рад/с до дозы 110 крад.

В работе исследовалось различие процессов восстановления АОВ после воздействия ИИ в пассивном и активном режимах. Активным облучением считаем такое, при котором в АОВ непрерывно вводилось излучение мощностью 100 мВт на длине волны поглощения 980 нм при воздействии ИИ и релаксации.

Пассивным облучением называем воздействие ИИ на АОВ без вводимой оптической мощности накачки (после измерения начальных значений выходной оптической мощности лазерный диод выключался и включался только на время измерения ( $\sim 10$  с)). Это было сделано, чтобы разделить восстановление АОВ под действием вводимого излучения на длине волны поглощения за счет фотообесцвечивания и естественного восстановления. Для кривой пассивного восстановления измерения проводились непосредственно после воздействия ИИ и затем с интервалом 30 мин в течение 3 ч.

Для исследования процессов релаксации РНП после облучения образцы АОВ, облученные в пассивном режиме, собирались в ЭСВИОИ (см. рис. 1). Снималась выходная мощность ЭСВИОИ, АОВ которого находилось при комнатной температуре и при повышенной температуре 60 °С. Также варьировалась мощность накачки АОВ. Условия восстановления для каждого образца приведены в таблице.

Условия восстановления для исследуемых образцов АОВ  
после облучения в пассивном режиме

№ АОВ	Промежуток времени с момента облучения до наблюдения восстановления АОВ	Мощность накачки, мВт	Температура, °С
1	4 недели	100	22
2	4 недели	150	22
3	4 недели	100	60
4	1 неделя	100	60

## 2. Результаты и обсуждение

РНП для активно облученного образца АОВ сравнимо с РНП зарубежного аналога [3]. В то же время зафиксирована разница 0,05 дБ/м в радиационно-наведенных потерях на длине волны 1550 нм при дозе 110 крад между образцами АОВ, облучавшимися в активном и пассивном режимах (рис. 2). Это свидетельствует о заметной зависимости РНП от уровня оптической мощности на длине волны поглощения 980 нм.

Релаксация РНП связана с распадом центров окраски. В соответствии с законом Бугера – Ламберта – Бера концентрация центров окраски в АОВ прямо пропорциональна РНП. Поэтому кривую релаксации РНП можно рассмотреть с точки зрения химической кинетики – определить наблюдаемый порядок реакции, константу скорости реакции и характерное время распада центров окраски [4].

Для нахождения наблюдаемого порядка реакции строилась зависимость логарифма концентрации центров окраски от логарифма скорости релаксации центров окраски. По тангенсу угла наклона прямой к оси абсцисс определялся наблюдаемый порядок реакции. Далее рассчитывались  $k$  – константа скорости реакции (1) и  $\tau_{1/e}$  – время уменьшения концентрации центров окраски в  $e$  раз (2):

$$k = \frac{1}{(n-1)t} \left( \frac{1}{[A]^{n-1}} - \frac{1}{a^{n-1}} \right), \quad (1)$$

$$\tau_{1/e} = \frac{e^{n-1} - 1}{(n-1)ka^{n-1}}, \quad (2)$$

где  $n$  – наблюдаемый порядок реакции,  $t$  – время,  $[A]$  – концентрация центров окраски,  $a$  – максимальная концентрация центров окраски.

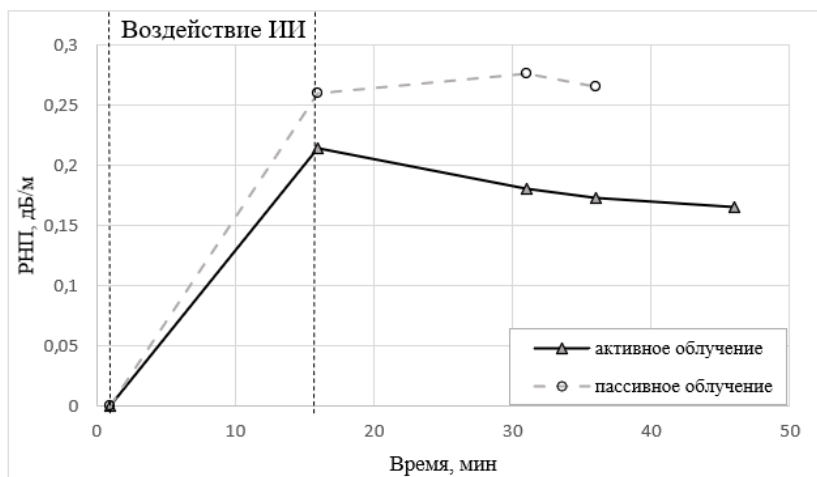


Рис. 2. Зависимость РНП ЭСВИОИ при воздействии ИИ и релаксации с непрерывно включенной накачкой АОВ (треугольники) и выключенной во время воздействия накачкой (кружки)

На зависимостях логарифма концентрации центров окраски от логарифма скорости релаксации центров окраски явно выделяются два подпроцесса с разными наблюдаемыми порядками реакции (рис. 3). Для начальной стадии, при которой идет быстрое восстановление, порядок реакции равен двум, т.е. при высокой концентрации центров окраски высока вероятность рекомбинации электронов и дырок за счет диффузии или перегруппировки, а для второй стадии – первый порядок, который означает, что при снижении концентрации дефекты достаточно удалены друг от друга, поэтому распад центра окраски, вероятно, не связан с процессами рекомбинации.

Энергия активации распада центров окраски составила 0,7 эВ для дозы 100 крад.

Исследование влияния разного уровня оптической мощности накачки на восстановление АОВ показало, что с увеличением мощности, вводимой в АОВ, уменьшается время восстановления АОВ (рис. 4). Кроме того, от вводимой в АОВ мощности зависит начальный уровень, с которого начинается восстановление. Стоит отметить, что генерационная способность исследуемого АОВ восстанавливается более чем на

90 % при комнатной температуре за 40 ч для накачки 100 и 30 ч для накачки 150 мВт. Характерные времена уменьшения концентрации центров окраски в  $e$  раз для образцов АОВ с мощностью накачки 100 и 150 мВт составили 9,4 и 7,8 ч соответственно.

Известно, что повышение температуры негативно влияет на генерационные характеристики АОВ, однако отжиг пассивных оптических волокон при повышенной температуре положительно отражается на скорости релаксации РНП. Получилось, что для исследуемых образцов АОВ релаксация при повышенной температуре наоборот затруднена, ее результаты значительно уступают релаксации при комнатной температуре (см. рис. 4). Затруднение релаксации РНП при повышенных температурах ранее было зафиксировано для волокон, легированных висмутом с матрицей германосиликатного стекла [5], но, к сожалению, без объяснения. Возможно, затруднение релаксации РНП при повышенных температурах свойственно самой алюмогерманосиликатной матрице стекла. Анализ показал, что потребуется не менее 315 ч для восстановления генерационной способности АОВ в  $e$  раз при температуре 60 °С и накачке 100 мВт.

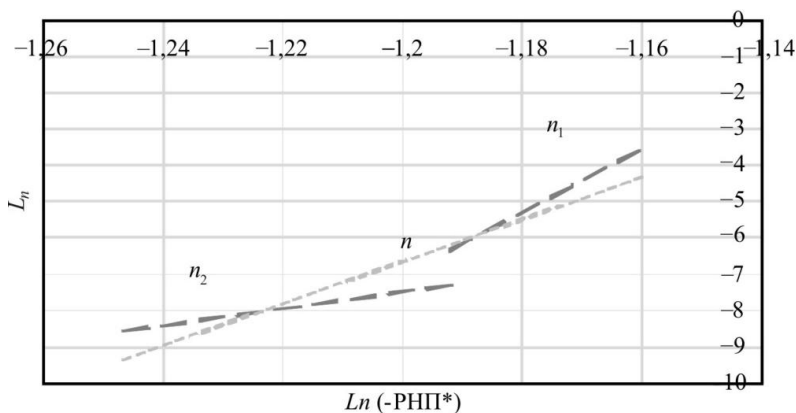


Рис. 3. Пример разложения процесса релаксации центров окраски на подпроцессы ( $\square$  – первый подпроцесс;  $\triangle$  – второй подпроцесс) для образца №3

Кроме того, получили заметную разницу в релаксационном поведении образцов АОВ №3 и 4 (см. рис. 4). Временной промежуток между облучением и прописью релаксации на температуре для первого образца составил четыре недели, а для второго – одна неделя, при этом уровень РНП за три недели снизился с 0,33 до 0,25 дБ/м. Для образца №4 наблюдается самый короткий промежуток времени, на котором наблюдается второй порядок реакции.

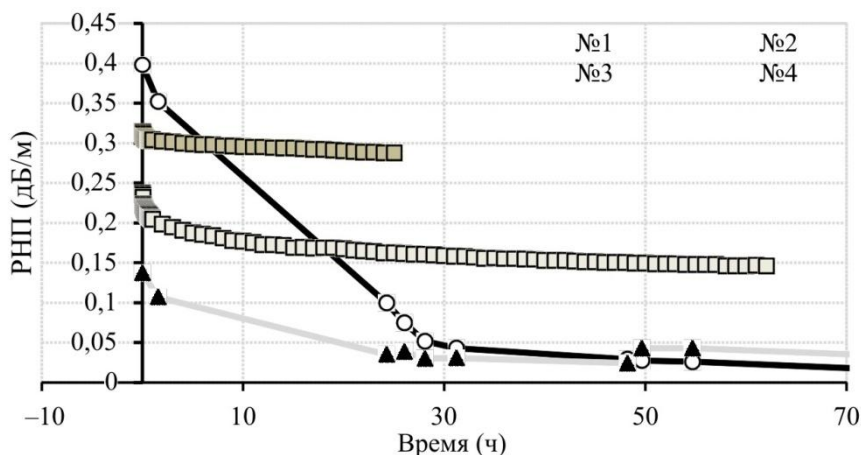


Рис. 4. Зависимость РНП от времени релаксации для ЭСВИОИ в разных условиях (см. таблицу), номера образцов приведены в легенде к рисунку

Это свидетельствует о том, что при повышенной температуре влияние уровня оптической мощности накачки на процесс релаксации РНП значительно меньше, чем при комнатной температуре, и уровень РНП зависит больше от времени после окончания облучения.

### Заключение

Проведено исследование влияния уровня оптической мощности накачки на 980 нм на РНП на длине волны 1550 нм при воздействии непрерывного гамма-излучения и релаксации для АОВ с сердцевиной из легированного эрбием и церием алюмогерманосиликатного стекла. Показано положительное влияние уровня оптической мощности на длине волны поглощения 980 нм на величину РНП как при облучении, так и при релаксации. Кроме того, выявлено затруднение релаксации РНП при температуре 60 °С по сравнению с релаксацией при комнатной температуре.

Определено, что процесс релаксации РНП в исследуемых АОВ состоит из двух подпроцессов. Вначале релаксации наблюдаемый порядок реакции равен двум, а затем порядок реакции становится равен одному. Длительность первого подпроцесса для образцов, облученных в одинаковых условиях, зависит от промежутка времени после облучения, температуры и уровня оптической мощности накачки. Энергия активации процесса распада центров окраски для исследуемого АОВ составила 0,7 эВ для дозы 100 крад.

### Список литературы

1. Алейник А.С., Кикилич Н.Е., Козлов В.Н., Власов А.А., Никитенко А.Н. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2016. – 16 (4). – С. 593.
2. Friebele E.J., Gingerich M.E., Griscom D.L. // Proc. SPIE 1791. – 1992. – P. 177–188.
3. Спецификация оптического волокна Rad Hard Active Fibers. – URL: <http://www.photonics.ixblue.com/> компании iXBlue
4. Леванов А.В., Антипенко Э.Е. Введение в химическую кинетику / МГУ им. М.В. Ломоносова. – М., 2006.
5. Radiation-induced absorption in bismuth-doped germanosilicate fibres / S.V. Firstov, V.F. Khopin, A.V. Kharakhordin, S.V. Alyshev, K.E. Riumkin, M.A. Melkumov, A.M. Khagai, P.F. Kashaykin, A.N. Gur'yanov, E.M. Dianov // Quantum Electronics. – 2017. – 47 (12). – P. 1120–1124.

### References

1. Aleinik A.S., Kikilich N.E., Kozlov V.N., Vlasov A.A., Nikitenko A.N. Metody postroeniia vysokostabil'nykh erbievykh superluminescentnykh volokonnykh istochnikov opticheskogo izlucheniia [Методы построения высокостабильных эрбиевых суперлюминесцентных волоконных источников оптического излучения]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2016, vol. 16 (4). pp. 593-607.
2. Friebele E.J., Gingerich M.E., Griscom D.L. Survivability of optical fibers in space. *Proc. SPIE* 1791. 1992, pp. 177-188.
3. Spetsifikatsiia opticheskogo volokna Rad Hard Active Fibers [Спецификация оптического волокна Rad Hard Active Fibers], available at: <http://www.photonics.ixblue.com/> компании iXBlue
4. Levanov A.V., Antipenko E.E. Vvedenie v khimicheskuiu kinetiku [Введение в химическую кинетику]. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi universitet imeni M.V. Lomonosova, 2006.
5. Firstov S.V., Khopin V.F., Kharakhordin A.V., Alyshev S.V., Riumkin K.E., Melkumov M.A., Khagai A.M., Kashaykin P.F., Gur'yanov A.N., Dianov E.M. Radiation-induced absorption in bismuth-doped germanosilicate fibres. *Quantum Electronics*, 2017, vol. 47(12), pp. 1120-1124.

Получено 13.03.2021