

09

Использование методов частотной оптической рефлектометрии для дистанционно-распределенных измерений дозы гамма-излучения

© А.В. Фаустов^{1,2}, А.В. Гусаров², Р. Мэгрет², М. Wuilpart²,
А.В. Жуков³, С.Г. Новиков³, В.В. Светухин³, А.А. Фотиади^{2,3,4}

¹ SCK · CEN, Boeretang 200, 2400 Mol, Belgium

² University of Mons, place du Parc 20, 7000 Mons, Belgium

³ Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия

⁴ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Andrei.Fotiadi@gmail.com

Поступило в Редакцию 29 октября 2014 г.

Приведены результаты полевых экспериментов по измерению дозы гамма-излучения с помощью частотного оптического рефлектометра. Для доз до 100 кГу показана возможность дистанционного измерения с точностью до 20%, а для доз до 9 кГу восстановление профиля распределения поглощенной дозы с разрешением 15 см. Обсуждаются факторы, влияющие на динамический диапазон и точность измерений.

В настоящее время важными являются приложения волоконной оптики для работы в радиационных полях, в системах мониторинга и безопасности объектов атомной энергетики [1]. Обратное рэлеевское рассеяние на замороженных неоднородностях показателя преломления оптического волокна — основной фактор, определяющий поглощение оптического сигнала в окнах спектральной прозрачности оптических волокон и влияющий на функциональность волоконных линий связи, волоконных лазеров и сенсоров [2–6]. Волоконно-оптическая OFDR-рефлектометрия (Optical Frequency Domain Reflectometry), основанная на рэлеевском рассеянии, является одной из самых перспективных технологий для распределенных измерений оптических волокон и распределенных датчиков [7,8]. Она привлекает внимание, прежде всего, возможностью восстановления распределения рассеивающих центров

в волокне при длинах зондирования в десятки метров и с пространственным разрешением в несколько микрон. В частности, возможность измерения оптических потерь в волокне с высоким пространственным разрешением делает данную технологию потенциально востребованной при создании распределенных волоконных дозиметров для систем ядерной безопасности.

В данной работе приведены результаты первых экспериментов по применению OFDR-рефлектометрии для дистанционно-распределенных измерений поглощенной дозы гамма-излучения до 100 kGy. Эксперименты проводились на промышленном испытательном стенде. Принцип измерения основан на регистрации радиационно-наведенного поглощения в фосфоросиликатных оптических волокнах, обладающих повышенной чувствительностью к радиационному облучению [1,9]. Рассмотрены факторы, влияющие на пространственное разрешение и точность измерений, а также ограничения технологии, связанные с наведенными суммарными потерями при ограниченном динамическом диапазоне допустимых потерь OFDR-рефлектометра.

Схема оптической установки представлена на рис. 1, а. Тестируемая волоконная линия состоит из трех сваренных между собой отрезков оптических волокон двух видов общей длиной ~ 35 м. Волоконные отрезки 1 и 3 — обычное телекоммуникационное волокно, отрезок 2 — радиационно-чувствительное волокно (НЦВО РАН, сердцевина, легированная оксидом фосфора, молярная концентрация 13.0%) [9] длиной 0.63 м. С помощью волоконных переключателей 7 тестируемая линия подключается либо к оптическому рефлектометру 4, либо к системе суперлюминесцентный источник 5—оптический спектроанализатор 6, используемой для калибровочных измерений суммарного поглощения в волоконной линии. Калибровочные измерения производились на фиксированной длине волны ~ 1550 nm и обрабатывались в предположении однородности коэффициента наведенного поглощения в радиационно-чувствительном волокне 2. Для распределенных измерений волоконная линия подключалась к оптическому рефлектометру 4 (OBR 4400, Luna Technology), который производил записи сигнала рэлеевского рассеяния с пространственным разрешением $38 \mu\text{m}$. Важной характеристикой используемого OFDR-рефлектометра является динамический диапазон допустимых суммарных потерь волокна при однократном прохождении оптического сигнала. Он определяется отношением интенсивности обратного рэлеевского рассеяния в тестируемом волокне к интенсив-

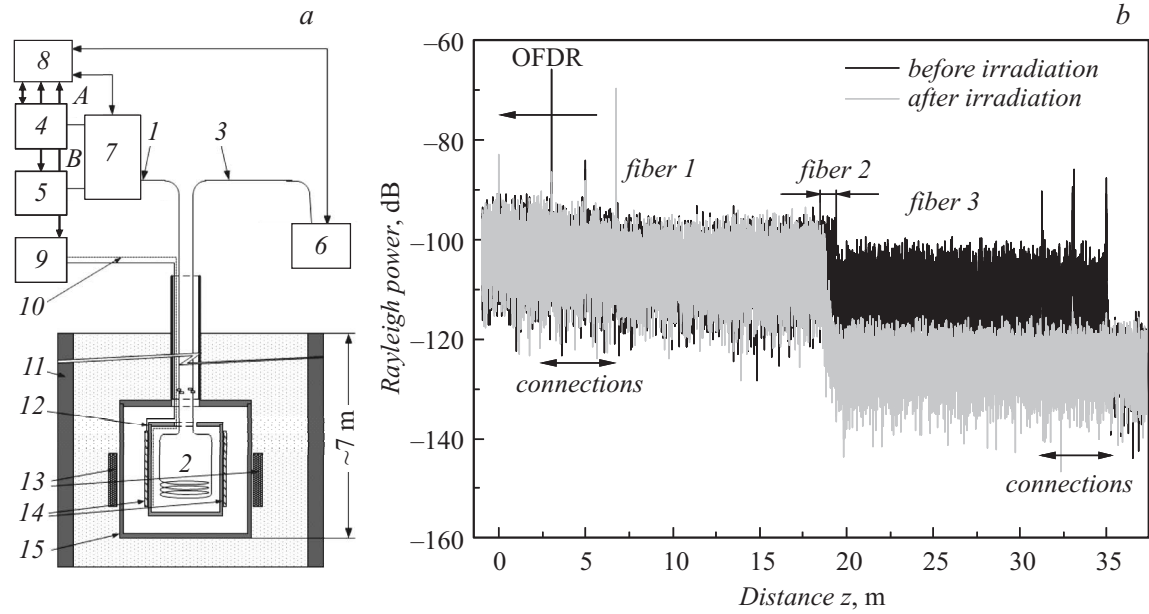


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а) и примеры исходных записей OFDR-рефлектометра до (черная кривая) и после (серая кривая) облучения (b). 1–3 — оптические волокна, 4 — OFDR-рефлектометр, 5 — суперлюминесцентный источник, 6 — спектроанализатор, 7 — волоконный переключатель, 8 — компьютер, 9 — терморегулятор, 10 — термопара, 11 — бассейн, 12 — печь, 13 — источники ^{60}Co , 14 — нагревательные элементы, 15 — контейнер для облучения.

ности собственных шумов рефлектометра. Для телекоммуникационного волокна (с уровнем рэлеевского рассеяния -100 dB/mm) динамический диапазон прибора составляет ~ 8 dB.

Для проведения дозиметрических измерений тестируемая волоконная линия была заключена в защитную гибкую трубку, а ее центральная часть, включающая волокно 2, помещалась в специальную камеру 15. Камера погружалась на глубину ~ 7 m водного бассейна 11, где обеспечивалось равномерное облучение волокна 2 от источников гамма-излучения ^{60}Co 13, расположенных снаружи. Хотя подводящие волокна 1 и 3 были также подвержены радиационному воздействию, радиационная чувствительность этих волокон мала и они не влияли на результаты измерения наведенного поглощения в радиационно-чувствительном волокне. Волокно находилось внутри трубки в свободном состоянии и подвергалось воздействию вибраций естественной среды. Такие специфические условия примерно в 2–4 раза увеличивали уровень шумов при записи рефлектограмм по сравнению с лабораторными испытаниями. Сама радиационная камера 15 снабжена средствами термостабилизации, обозначенными на рис. 1, а. В ходе всего эксперимента температура в ней поддерживалась на уровне $T = 60^\circ\text{C}$ с точностью до $\Delta T = 0.1^\circ\text{C}$, что исключало влияние температуры на радиационные измерения [10].

Мощность дозы радиации в месте расположения волокна 2 составляла $R = 566$ Gy/h, время эксперимента ~ 170 h. На рис. 1, b представлены примеры записей сигнала обратного рассеяния $P_s(z)$, сделанные с приборным пространственным разрешением $\delta z = 38$ μm до и сразу после облучения. Участок, соответствующий рассеянию от волокна 2, находится в середине записи (18.6–19.2 m). На рефлектограммах наблюдаются характерные скачки, связанные с локальными потерями в местах сварки волокон различных видов. На второй рефлектограмме ясно выражен скачок, связанный с радиационно-наведенным поглощением в волокне 2. Хорошо видно, что рефлектограммы имеют высокий уровень шумов. Численная обработка рефлектограмм заключалась в усреднении измеренных кривых по длинам Δz . При этом уровень шумов снижался в $\sim \sqrt{\Delta z / \delta z}$ раз. Таким образом, могла быть улучшена точность определения наведенного поглощения $\alpha(z)$ за счет ухудшения пространственного разрешения Δz .

На рис. 2, а показана динамика записываемых сигналов рэлеевского рассеяния $P_s(z)$, сделанных с интервалом в ~ 10 h. Пространственное

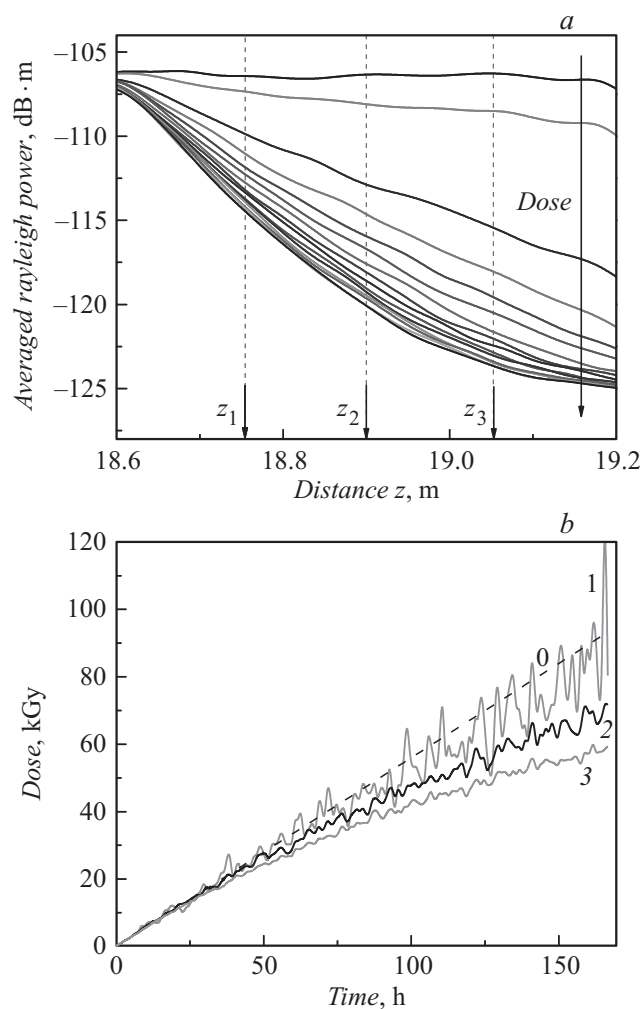


Рис. 2. Рефлектограммы, записанные с временным интервалом в 10 h и обработанные с пространственным разрешением $\Delta z = 3.8$ cm (a). Результаты восстановления поглощенной дозы в точке $z_1 = 18.75$ m с разным пространственным разрешением Δz (b): 0 — калибровочная кривая, кривые 1–3 — $\Delta z = 7, 15, 19$ cm соответственно.

разрешение после усреднения составляет $\Delta z = 3.8$ см. Для времен облучения $t < 15$ h, т.е. доз $D < 8.5$ kGy, распределение измеренного сигнала по длине (в логарифмической шкале) остается линейным, что согласуется с равномерным распределением наведенного поглощения в волокне $\partial P_s(z)/\partial z = -\alpha(z)P_s$ при однородном облучении. При больших дозах наблюдается отклонение от линейности, что свидетельствует об ошибке измерения.

Динамика поглощенной дозы D восстанавливалась из измерений радиационно-наведенного поглощения по известной функциональной зависимости [9]:

$$\alpha(D) = \sum_{i=1}^3 a_i \left(1 - \exp \left(-\frac{D}{D_i} \right) \right), \quad (1)$$

где коэффициенты $a_1 = 16.7$ dB, $a_2 = 4.2$ dB, $a_3 = 7.5$ dB, $D_1 = 54.7$ kGy, $D_2 = 2.2$ kGy, $D_3 = 9.8$ kGy были определены для аппроксимации калибровочной кривой.

На рис. 2, *b* представлены результаты измерения поглощенной дозы в точке $z_1 = 18.75$ м (см. рис. 2, *a*), находящейся внутри радиационно-чувствительного волокна. Данные представлены в сравнении с калибровочной кривой 0 для различных пространственных разрешений $\Delta z = 7, 15$ и 19 см (кривые 1–3). При пространственном разрешении $\Delta z = 7$ см кривая восстановленных значений наиболее близка к калибровочной, но на ней имеются значительные случайные флуктуации, приводящие к ошибке определения дозы в каждый конкретный момент времени. При увеличении пространственного разрешения эти флуктуации сглаживаются, но при этом измеренные значения все более отклоняются от калибровочной кривой, т.е. растет систематическая ошибка, которая наиболее отчетливо выражена в конце облучения. Это объясняется тем, что при сильном поглощении зондирующего излучения в волокне сигнал обратного рэлеевского рассеяния с дальних отрезков волокна падает ниже уровня собственных шумов рефлектометра, выходя за предел динамического диапазона допустимых потерь. Чем больше длина усреднения Δz , тем больше вклад этих отрезков в усредненный сигнал, приводящий к ошибке.

На рис. 3, *a* эти данные представлены в виде относительной ошибки измерения поглощенной дозы. Они определяют границы применимости системы для дистанционных измерений на длине $z_1 = 18.75$ м. Хорошо видно, что при пространственном разрешении $\Delta z = 15$ см (кривая 2)

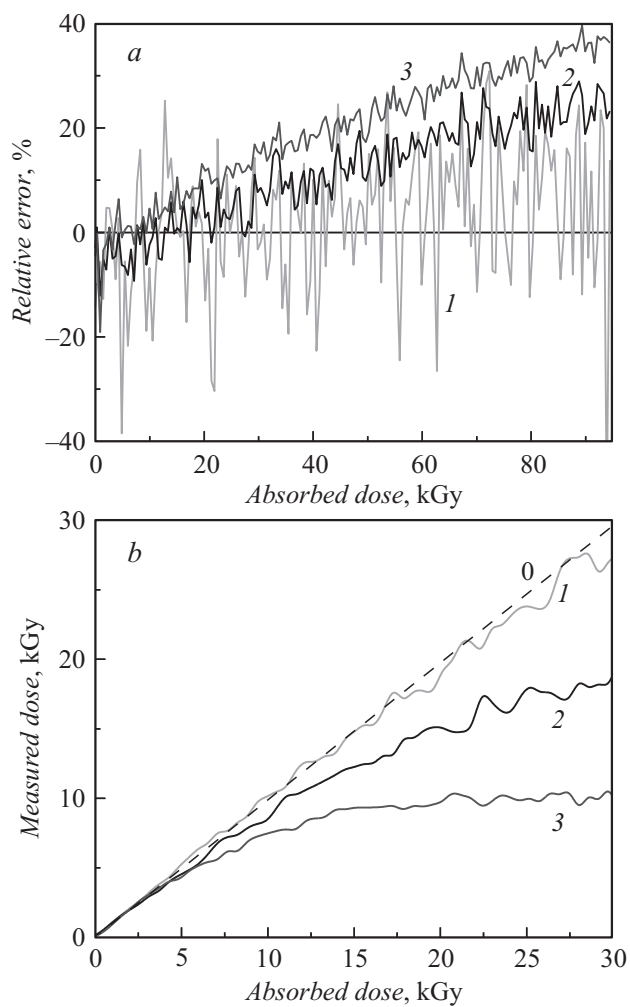


Рис. 3. Относительная ошибка дистанционного измерения поглощенной дозы в точке $z_1 = 18.75$ м (а): кривые 1–3 — $\Delta z = 7, 15, 19$ см соответственно. Результаты распределенного измерения поглощенной дозы с разрешением $\Delta z = 15$ см (б): 0 — калибровочная кривая, кривые 1–3 — в точках $z_1 = 18.75$ м, $z_2 = 18.90$ м и $z_3 = 19.05$ м соответственно.

систематическая ошибка в $\sim 20\%$ достигается при дозах ~ 80 kGy, в то время как при $\Delta z = 19$ см (кривая 3) та же ошибка достигается при дозах ~ 40 kGy. Связь между пространственным разрешением и систематической ошибкой измерения дозы позволяет рассчитать и компенсировать систематическую ошибку. С другой стороны, сильно флуктуирующая кривая 1, соответствующая минимальному пространственному разрешению $\Delta z = 7$ см, в среднем дает наиболее малую систематическую ошибку ($< 5\%$) во всем диапазоне доз. Это означает, что использование методов предикт-коррекции (т.е. использование усреднения по времени) позволяет достаточно точно определить динамику дозы до 100 kGy, поглощенной от постоянных источников.

На рис. 3, *b* представлены результаты распределенных измерений поглощенной дозы. Данные получены при пространственном разрешении $\Delta z = 15$ см для точек $z = z_1, z_2, z_3$, помеченных на рис. 2, *a*. Кривая 1 описывает динамику измерения поглощенной дозы в ближней точке 1 ($z_1 = 18.75$ м), она наиболее близка к калибровочной кривой 0. На больших дальностях ($z_2 = 18.90$ м, $z_3 = 19.05$ м) отклонение от калибровочной кривой больше. Это объясняется тем, что по мере продвижения в глубь волокна оптический сигнал затухает и суммарные наведенные потери на длине наблюдения исчерпывают резерв разрешенного динамического диапазона рефлектометра. При нарастании поглощенной дозы и увеличении наведенного поглощения это происходит на все более меньших дальностях z , приводя к ограничению предельной длины волоконной линии, доступной для дозиметрии. Так на кривой 3 ошибка в 20% достигается при дозе в ~ 9 kGy, что определяет предельные возможности системы для распределенных измерений дозы с разрешением $\Delta z = 15$ см. При более низких разрешениях та же ошибка достигается уже при больших дозах.

Таким образом, в данной статье приведены результаты экспериментов по применению OFDR-рефлектометрии для дистанционно-распределенных измерений доз гамма-излучения в условиях, приближенных к промышленным. Дозы радиации были намеренно доведены до уровня, когда их измерения приводят к ошибкам. Это позволило описать динамику развития ошибок и выявить основные факторы, ограничивающие применение метода. Показано, что возможность такого применения определяется динамическим диапазоном допустимых потерь OFDR-рефлектометра. Пока суммарные наведенные потери волокна находятся внутри данного диапазона, метод обеспечивает достаточно

точное дистанционное измерение дозы поглощенного излучения с пространственным разрешением в десяток сантиметров при дальностях в десяток метров. При превышении границ динамического диапазона метод дает заниженные оценки для измеренной дозы. При этом ошибка тем больше, чем хуже пространственное разрешение, используемое при численной обработке исходных рефлектограмм. С другой стороны, заниженное пространственное разрешение приводит к большим ошибкам при измерении доз радиации в каждый конкретный момент времени. Заметим, что в эксперименте задавалось однородное по всей длине чувствительного волокна гамма облучение. Однако этот факт не ухудшает качества оценки характеристик восстановления профиля дозы и не влияет на общность результатов эксперимента. Восстановление профиля дозы осуществляется через измерения пространственного распределения сигналов рэлеевского рассеяния, которое неоднородно по длине волокна даже при однородном распределении дозы.

В эксперименте были определены предельные возможности системы: для доз до 9 kGy показана возможность восстановления профиля распределения поглощенной дозы с разрешением 15 см. Эти результаты относятся к конкретному радиационно-чувствительному волокну (с заданной концентрацией оксида фосфора и длиной 0.63 м), но они могут служить отправной точкой для оценки возможности систем с другими параметрами. В частности, понятно, что длина участка распределенной регистрации дозы излучения может быть увеличена, например, до 10 м (т.е. в 15 раз) при использовании того же волокна, но со снижением предельной дозы в 15 раз или с теми же предельными дозами, но при снижении в 15 раз чувствительности волокна (т.е. концентрации оксида фосфора в волокне).

Таким образом, приведенные в статье данные позволяют определить характерный диапазон параметров радиационного поля, пригодного для измерения обсуждаемым методом, и выбрать правильный баланс чувствительности волокна, пространственного разрешения, времени измерений и длины участка распределенной регистрации дозы излучения, ввести корректирующие поправки для расширения динамического диапазона измеряемых доз радиации.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (шифр проекта RFMEFI57714X0074). This research was partly supported by the FP7 IRSES project and the IAP program VII/32 of the Belgian Science Policy.

Список литературы

- [1] *Tomashuk A.L., Grekov M.V.* et al. // Optics Express. 2014. V. 22. N 14. P. 16 778–16 783.
- [2] *Нестеров Е.Т., Трещиков В.Н.* и др. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 9. С. 55–63.
- [3] *Потапов В.Т., Мамедов А.М.* и др. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 12. С. 88–94.
- [4] *Фотиади А.А., Кяли Р.В.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 4. С. 72–81.
- [5] *Fotiadi A.* // Nature Photonics. 2010. V. 4. P. 204–205.
- [6] *Preda C., Fotiadi A., Mégret P.* // Opt. Express. 2012. V. 20. P. 5783–5788.
- [7] *Glombitza U., Brinkmeyer E.* // IEEE J. Lightwave Technology. 1993. V. 11. P. 1377–1384.
- [8] *Zheng J.* Optical frequency-modulated continuous-wave (FMCW) interferometry (Springer series in optical sciences: V. 107). Springer, 2005. 245 p.
- [9] *Faustov A., Gusarov A.* et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2013. V. 60. P. 2511–2517.
- [10] *Faustov A., Gusarov A.* et al. // Proc. SPIE 8794. Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors. 2013. P. 879430.