

УДК 681.7.068.4

Исследование оптических потерь пластиковых сцинтилляционных волоконных световодов при растяжении

Роднова Ж. Н.¹, Лазарев В. А.^{1,*},
Леонов С. О.¹, Дворецкий Д. А.¹,
Карасик В. Е.¹

* sintetaza@mail.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В работе рассмотрена задача измерений оптических потерь сцинтилляционных волоконных световодов, которые в настоящее время широко используются в качестве датчиков частиц в нанотехнологиях, ядерной физике и атомной энергетике, физике элементарных частиц. Проведено исследование потерь световодов, предложен способ получения скола световода, разработана структурно-функциональная схема установки для измерений потерь в световодах, проведены измерения оптических потерь световода в зависимости от его растяжения. Установлено, что относительная деформация, при которой происходит увеличение оптических потерь на 1,8 дБ/м, составляет 0,6 %. Полученные результаты необходимо учитывать при проведении расчета предельной чувствительности детекторов элементарных частиц на основе сцинтилляционных световодов.

Ключевые слова: сцинтилляционный волоконный световод, оптические потери, спектрометр, ослабление, изгибные потери

Введение

В настоящее время в физике элементарных частиц получили широкое распространение детекторы на основе сцинтилляционных пластиковых волоконных световодов. Такие детекторы позволяют определять траекторию рассеянных протонов и электронов и проводить измерения яркости в коллайдерах в точках столкновений частиц [1]. С помощью сцинтилляционных счетчиков можно измерять энергетические спектры электронов и γ -лучей [2].

Принцип действия сцинтилляционных детекторов основан на флуоресцентных свойствах определенных материалов при взаимодействии с частицей или излучением, которые основаны на преобразовании энергии сталкивающихся частиц в фотоны видимой области.

Такие материалы называются сцинтилляторами. Путем регистрации флуоресцентного излучения с помощью фотоприемного устройства можно провести анализ для получения информации о частице или излучении, взаимодействующих с пластиковым волоконным световодом.

Широко применяемые в настоящее время сцинтилляционные детекторы на основе пластиковых волоконных световодов имеют общую конструктивную особенность, связанную с вертикальным закреплением световода. Вследствие такого закрепления в световодах возникает растяжение, вызванное собственной силой тяжести, что приводит к изменению оптических потерь и возможному ухудшению передачи излучения сцинтилляции [3].

Целью настоящей работы является измерение ослабления сцинтилляционных волоконных световодов, а также зависимости их потерь от величины растяжения. В работе предложен способ скалывания полимерного световода, разработана структурно-функциональная схема установки для измерений потерь в световодах, создана установка для измерений потерь пластикового волоконного световода, проведены измерения потерь пластикового световода, а также их зависимость от величины растяжения световода.

1. Устройство сцинтилляционного детектора на основе пластикового волоконного световода

Типичный сцинтилляционный детектор состоит из трех основных частей: сцинтиллятора, фотодетектора и системы вывода (рис. 1). В качестве сцинтилляторов используются различные виды материалов, которые можно разделить на две группы: неорганические (кристаллы, стекла и газы) и органические (кристаллы, пластики и жидкости) [1]. Неорганические сцинтилляторы характеризуются высоким квантовым выходом и низким быстродействием, в то время как органические сцинтилляторы, наоборот, имеют большее быстродействие при меньшей эффективности. Для фотодетектирования сцинтилляционных сигналов широко применяются высокочувствительные приёмники излучения на основе фотоэлектронных умножителей. Тип системы вывода определяется конкретным схемным решением сцинтилляционного детектора.



Рис. 1. Структурная схема сцинтилляционного детектора

В органических сцинтилляторах используется ионизация заряженными частицами для генерации оптических фотонов, обычно в сине-зеленой области спектра. Сцинтилляционный свет в органических смесях получается вследствие переходов, совершаемых свободными электронами в молекулах.

На практике среди органических сцинтилляционных материалов наиболее широкое распространение получили полимерные материалы вследствие отлаженной технологии их изготовления и формовки, невысокой стоимости и практичности, особенно в случае изготовления твердых сцинтилляционных детекторов больших объемов. Органический пластиковый сцинтиллятор изготавливается путем получения первичного раствора и его дальнейшей полимеризации. Большинство пластиковых сцинтилляторов, используемых в детекторах, созданы на основе полистирена или полиметилметакрилата [2].

На рис. 2 проиллюстрирован принцип работы сцинтиллятора на основе пластикового волокна. Ионизирующее излучение создает возбужденные состояния в пластиковой основе. Далее возбуждение переходит от пластиковой основы к молекулам первичной флуоресценции, массовая доля которых составляет 1 %. Такой энергетический переход обусловлен диполь-дипольным взаимодействием, впервые описанном Фёрстером [4]. Длина волны первичной флуоресценции составляет 340 нм. Фотон первичной флуоресценции распространяется в световоде на расстояние порядка 10^{-4} м. Для смещения длины волны флуоресценции используются специальные добавки, на которых происходит вторичная флуоресценция. В качестве таких добавок используют соединения на основе акрила (массовая доля составляет 0,05 %), которые не чувствительны к ионизирующему и черенковскому излучению. Длина волны излучения вторичной флуоресценции, которой регистрируется фотоприемником, составляет 400 нм. Длина ослабления излучения вторичной флуоресценции составляет около 1 метра и, по предварительным данным, зависит от натяжения световода.

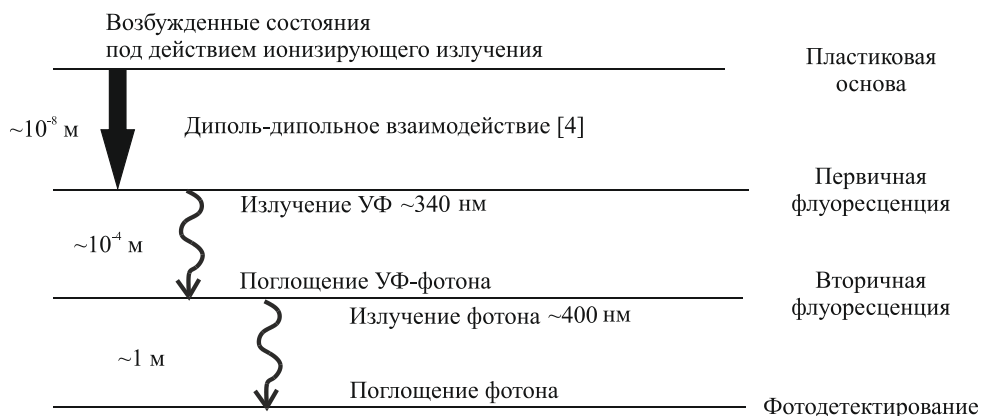


Рис. 2. Принцип работы пластикового сцинтиллятора

В ходе работы проводилось исследование пластиковых волоконных световодов марки Kuraray SCSF-78MJ, которые широко используются в современных сцинтилляционных детекторах [3]. На рис. 3 представлено сечение такого световода и указаны соответствующие показатели преломления.

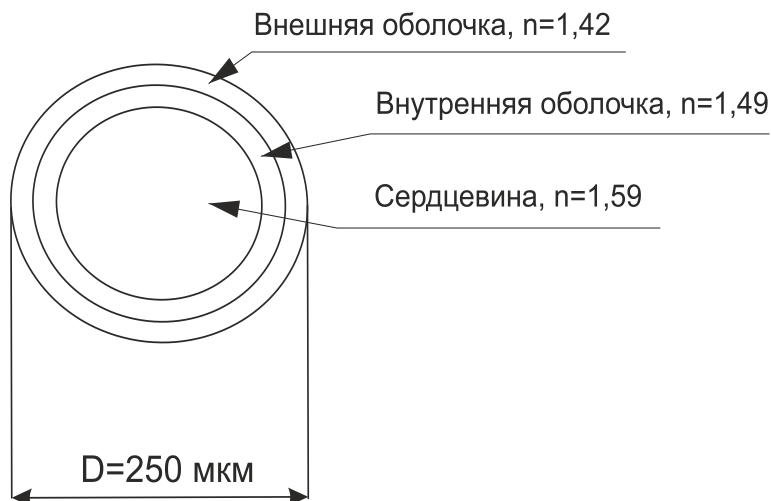


Рис. 3. Сечение пластикового световода Kuraray SCSF-78MJ

Параметры световодов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры пластиковых световодов марки Kuraray SCSF-78MJ

Параметр		Значение
Диаметр волокна		250 мкм
Центральная длина волны флуоресценции		450 нм
Материал	Сердцевины	Полистирол
	Внутренней оболочки	Полиметилметакрилат
	Внешней оболочки	Фторированный полимер

Числовая апертура световода составляет $NA = 0,72$. Полученное значение числовой апертуры позволит провести подбор компонентов установки для измерений потерь в данном световоде.

2. Схема установки

На первом этапе работы было проведено исследование способов получения качественного скола световодов. Разработан способ скалывания, который обеспечил получение ровного торца световода удовлетворительного качества, что важно для последующих измерений. Качество скола контролировалось с помощью микровидеокамеры, входящей в

состав аппарата для сварки волоконных световодов марки Fujikura. На рис. 4 представлены снимки торцев световода, полученные в ходе работы.

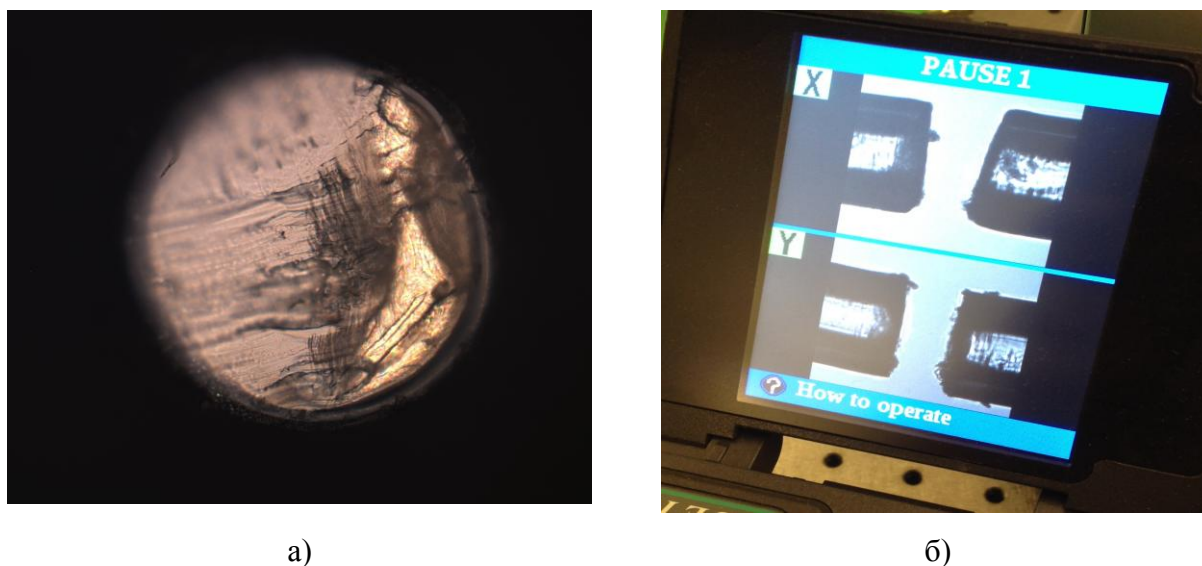


Рис. 4. Изображения сколотых торцев световода, полученные с помощью: а – микроскопа Axio; б – микровидеокамеры

На втором этапе было проведено измерение потерь и их сравнение с данными производителя. Для этого разработана установка, схема которой представлена на рис. 5.

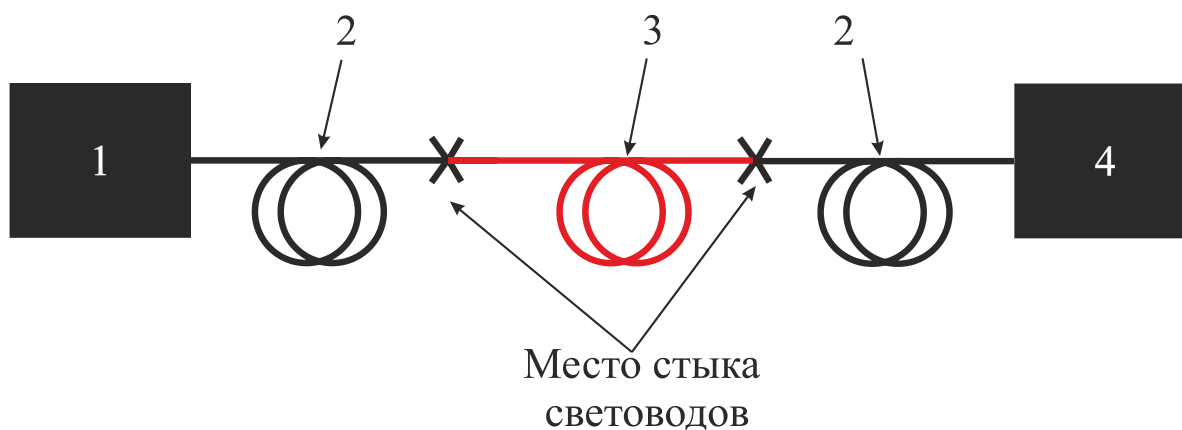


Рис. 5. Схема установки с диодом в качестве источника излучения для измерения потерь световода (1 – светоизлучающий диод; 2 – кварцевый световод AFS105/125Y; 3 – измеряемый световод Kuraray SCSF78-MJ; 4 – оптический спектроанализатор)

На схеме источник излучения 1 на длине волны 450 нм – лазерный диод (LED Ocean Optics LS-450) подключается через коннектор SMA905 к кварцевому волоконному световоду 2 марки AFS105/125Y с числовой апертурой 0,22. Излучение из кварцевого световода вводится в пластиковый волоконный световод 3 посредством контакта торцев-торцев.

Излучение выводится из пластикового световода в кварцевый волоконный световод 2 с коннектором SMA905 на выходе, который подключается к спектрометру 4 (Ocean Optics QE65000). В световод вводятся дополнительные потери на изгиб с целью исключения потерь, вызванных рассеянием во внешних оболочках световода.

3. Метод измерений

Для измерений оптических потерь сцинтилляционных световодов используется метод обрыва (cut-off method) [5-7]. Этот метод применяется для определения ослабления, причем уровень мощности на выходе исследуемого световода измеряется без изменения условий ввода. Метод основан на сравнении значений мощности оптического излучения, измеренной на выходе участка световода и на выходе укороченного участка световода, образованного отсечением отрезка известной длины. Ослабление $A(\lambda)$ в дБ на длине волны λ определяется следующим согласно выражению:

$$A(\lambda) = 10 \lg \frac{P_1}{P_2},$$

где P_1 – средняя оптическая мощность на выходе измеряемого волоконного световода;

P_2 – средняя оптическая мощность на выходе укороченного отрезка измеряемого волоконного световода.

Ослабление (в дБ) на единицу длины можно получить, воспользовавшись выражением:

$$\alpha(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{L_2 - L_1},$$

где $L_2 - L_1$ - разность длин укороченного отрезка и начального отрезка световода.

4. Результаты измерений

При проведении эксперимента на установке, включавшей в себя лазерный диод в качестве источника излучения и спектрометр в качестве приемника (рис. 5), были получены данные, приведенные на рис. 6. Штриховой линией 1 обозначен график, полученный производителем, цифрами 2-4 обозначены данные, полученные экспериментально. Поведение графиков, построенных по полученным экспериментальным данным, схоже, однако существен разброс значений величины ослабления, что свидетельствует о низкой воспроизводимости результатов. Данная схема измерений зависимости потерь от длины волны позволила установить качественный характер зависимости потерь в световоде от длины волны, сравнимый с данными производителя.

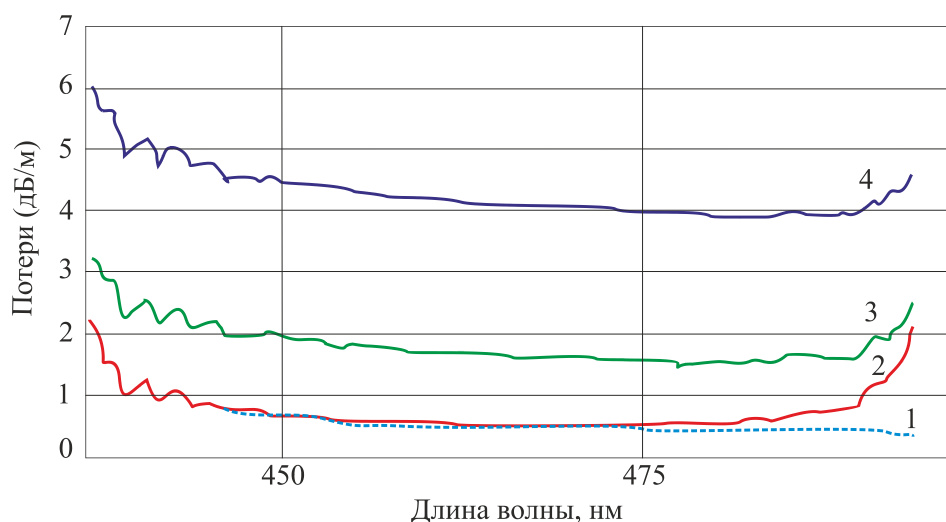


Рис. 6. График зависимости потерь от длины волны

Полученные результаты имеют большой разброс значений, что говорит о неудовлетворительной точности измерений на разработанной установке. С целью повышения точности измерений была разработана новая схема установки, представленная на рис. 7.

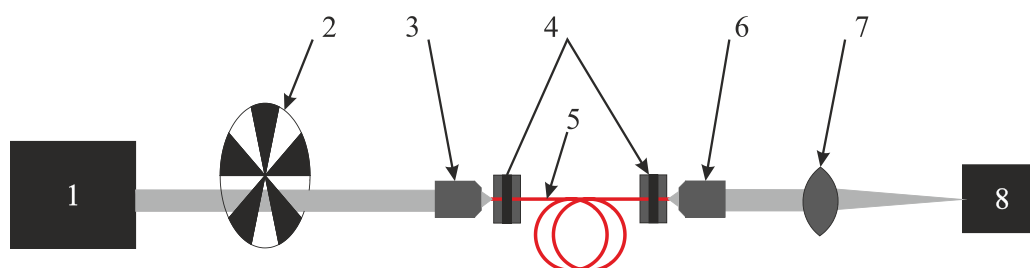


Рис. 7. Схема установки с белым лазером в качестве источника излучения для измерений потерь световода (1 – белый лазер с перестраиваемым акустооптическим фильтром; 2 – модулятор; 3 – объектив ввода (20х); 4 – узлы юстировки волокна; 5 – измеряемый световод; 6 – объектив вывода; 7 – согласующая линза; 8 – приемник излучения)

Излучение источника 1 – белого лазера с перестраиваемым акустооптическим фильтром – проходит через модулятор излучения 2, фокусируется на торце пластикового световода 5 при помощи узла ввода 4 и объектива 3. На выходе пластикового световода 5 установлен узел вывода 4 и объектив 6. Излучение на выходе объектива 6 собирается линзой 7 на площадке фотоприемного устройства 8. Фотоприемное устройство 8 подключено к осциллографу, с помощью которого проводится измерение сигнала на выходе измеряемого световода 5. В световод вводятся дополнительные потери на изгиб с целью вывода излучения из внешних оболочек световода. Результаты проведенных измерений приведены на рисунке 8.

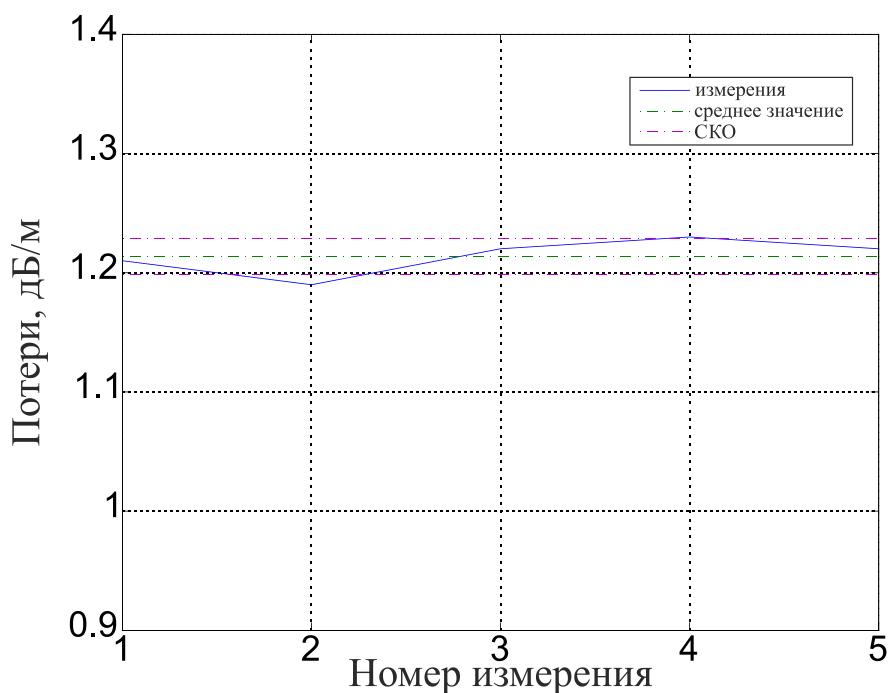


Рис. 8. Результаты измерений потерь для длины волны 437 нм

Полученные результаты сравнивались с данными производителя. Сравнение показало, что результаты отличаются в пределах 2%, что говорит о возможности использования данной установки для измерения зависимости потерь световода от длины волны.

Исследования зависимости потерь в световоде при его растяжении проводились на установке схема которой представлена на рис. 9. Один торец измеряемого волокна закреплялось неподвижно, а другой в специальной подвижке 7.

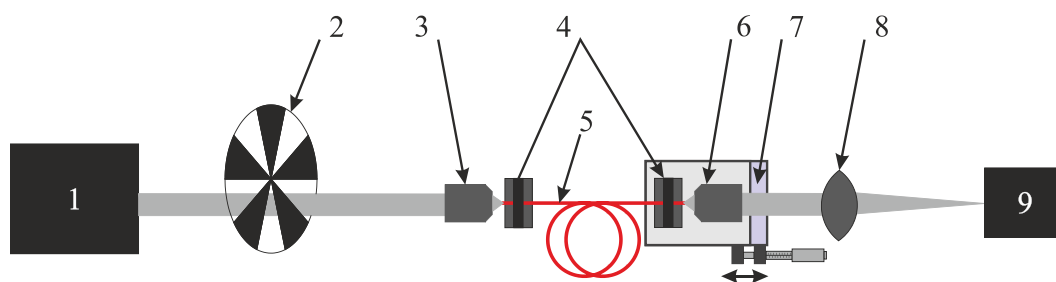


Рис. 9. Схема установки с белым лазером в качестве источника для измерений зависимости потерь световода от растяжения (1 – белый лазер с перестраиваемым акустооптическим фильтром; 2 – модулятор; 3 – объектив ввода (20х); 4 – узлы юстировки волокна; 5 – измеряемый световод; 6 – объектив вывода; 7 – перемещающийся столик для растяжения пластикового волокна; 8 – согласующая линза; 9 – приемник излучения)

Образцы световодов закреплялись на упорах 4 путем приклеивания их концов к подвижке с микрометрическим винтом 7. Так как внешняя оболочка световода выполнена из фторированного полимера, то в качестве клея для закрепления образца использован этилацетат. Испытания образцов световода показали, что такой способ закрепления образцов обеспечивает растяжение образцов вплоть до их разрушения.

Разрушающее напряжение при испытании световода по данной схеме было вычислено в работе [8] и определяется по формуле:

$$\sigma = E \frac{d}{0,84D}$$

где $E = 3000$ МПа – модуль упругости полиметилметакрилата;

$d = 250$ мкм – диаметр образца;

$D = 3,5$ мм – расстояние между зажимными подвижками в момент разрушения.

Растягивающую силу, необходимую для разрушения образца, можно определить согласно выражению:

$$F = \frac{\sigma \pi d^2}{4}$$

Таким образом, только при растяжении волокна под действием силы порядка 12,7 Н напряжение, возникающее в образце, станет достаточным для разрушения образца. Критическое удлинение образца длиной 1,75 м, при котором начинается его разрушение, составило 0,6 %.

Результаты эксперимента представлены на рис. 10.

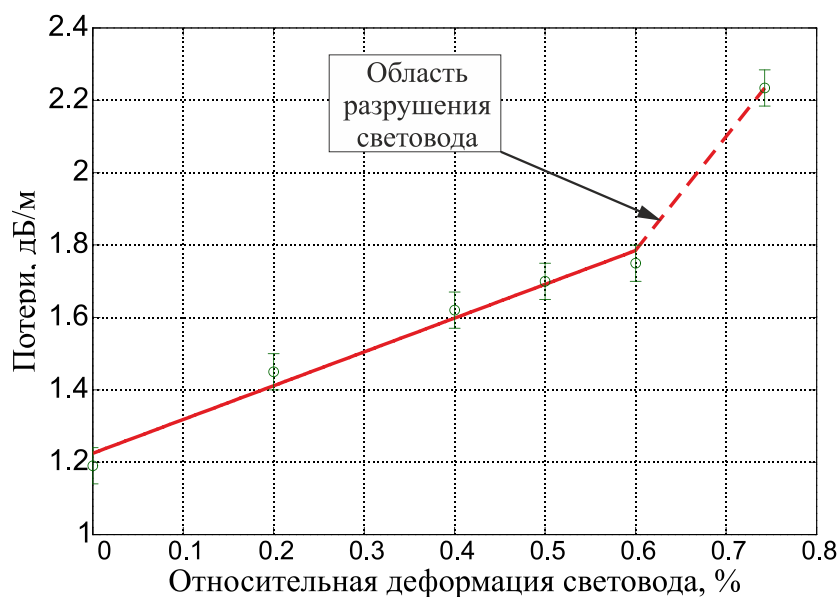


Рис. 10. Зависимость потерь в световоде от растяжения

В ходе эксперимента было установлено, что при деформации $\delta = 0,2 \%$ (длина световода 1,75 м, удлинение 3,5 мм) потери сцинтилляционного световода составили 1,4 дБ/м. На пороге разрушения (0,6 % деформации) потери увеличивались до 1,8 дБ/м. Из графика видно, что зависимость потерь от растяжения имеет линейный характер.

Полученные данные необходимо учитывать при работе со световодами, в частности при расчете предельной чувствительности детектора элементарных частиц на основе сцинтилляционных световодов.

5. Заключение

Создана экспериментальная установка для измерения потерь в пластиковых световодах. Проведены измерения потерь на выходе световода. Установлена их зависимость от величины растяжения световода. При деформации $\delta = 0,2 \%$ (длина световода 1,75 м, удлинение 3,5 мм) потери сцинтилляционного световода составили 1,4 дБ/м. На пороге разрушения, при деформации $\delta = 0,6 \%$, потери увеличились до 1,8 дБ/м. Полученные результаты позволяют провести корректировку расчета предельной чувствительности детекторов элементарных частиц на основе сцинтилляционных световодов.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-937.2014.8.

Список литературы

1. Mapelli A. Scintillation Particle Detectors Based on Plastic Optical Fibres and Microfluidics: thesis for obtaining D.Sc. Lausanne, 2011.
2. Bisplinghoff J., Eversheim D., Eyrych W., Joosten R., Nähle O., Stinzinger F., Teufel A., Wagner M., Webb R., Wirth S., Ziegler R. A scintillating fibre hodoscope for high rate applications // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2002. Vol. 490, no. 1-2. P. 101-111. DOI: [10.1016/S0168-9002\(02\)01064-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01064-1)
3. Radiation damage on Kuraray SCSF-78M and SCSF-78MJ fibers: literature study, September 2012 / LHC. Lausanne: LHC, 2012. 15 p.
4. Foerster T. Zwischenmolekulare Energiewanderung und Fluoreszenz // Annalen Der Physik - Berlin. 1948. Vol. 437, no. 2. P. 55-57. DOI: [10.1002/andp.19484370105](https://doi.org/10.1002/andp.19484370105)
5. IEC 60793-1-47: 2009 Optical fibres – Part 1: Measurement methods, 2009.
6. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. М.: ЛЕСАРпт, 2003. 106 с.

7. Цаплин А.И., Лихачев М.Е. Методы измерений в волоконной оптике. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. 227 с.
8. Duncan W.J., France P.W., Craig S.P. The Effect of Environment on the Strength of Optical Fiber // Proc. of NATO Advanced Research Workshop on Strength Inorganic Glass, Algarve, 1983. 19 p.

Optical Loss Study of Plastic Scintillating Fibers under Tension

Zh. N. Rodnova¹, V.A. Lazarev^{1,*}, S.O. Leonov¹,
D.A. Dvoreckii¹, V. E. Karasik¹

[*sintetaza@mail.ru](mailto:sintetaza@mail.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: scintillating plastic fiber, optical loss, spectrometer, attenuation, bending loss

In this work we are dealing with measuring optical loss of a plastic scintillation fibers under tension. These fibers are used in scintillation detectors, where it is mounted vertically and can be exposed to deformations under gravity force. The goal of work is to measure optical loss of the fiber under tension. First part of current work is connected with fiber cleaving technique developing. Second part is connected with experimental setup scheme developing with fiber-to-fiber contact for measurement optical loss by cut-of method. This method based on comparison output power from long piece of a fiber to small one. The small piece of a fiber is obtained by cutting long one. The experimental setup for optical loss measurement is built. The optical loss measurements are conducted. The results obtained are compared to manufacturer ones. The accuracy of measuring technique is calculated. The optical loss measurement according to the fiber deformation is carried out. The fiber critical extension is calculated. The critical extension for 1.75m sample is equal to 0.6%. The optical loss via deformation dependence is established. At deformation 0.2% (sample length 1.75m, extension 3.5mm) the optical loss is 1.4 dB/m. At the breaking point (deformation 0.6%) optical loss is 1.8 dB/m. The results obtained should be taken into account during developing of elementary particle detectors.

References

1. Mapelli A. *Scintillation Particle Detectors Based on Plastic Optical Fibres and Microfluidics: thesis for obtaining D.Sc.* Lausanne, 2011.
2. Bisplinghoff J., Eversheim D., Eyrich W., Joosten R., Nähle O., Stinzing F., Teufel A., Wagner M., Webb R., Wirth S., Ziegler R. A scintillating fibre hodoscope for high rate applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2002, vol. 490, no. 1-2, pp. 101-111. DOI: [10.1016/S0168-9002\(02\)01064-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01064-1)
3. Radiation damage on Kuraray SCSF-78M and SCSF-78MJ fibers: literature study, September 2012, LHC. Lausanne, LHC, 2012. 15 p.

4. Foerster T. Zwischenmolekulare Energiewanderung und Fluoreszenz. *Annalen Der Physik – Berlin*, 1948, vol. 437, no. 2, pp. 55-57. DOI: [10.1002/andp.19484370105](https://doi.org/10.1002/andp.19484370105)
5. IEC 60793-1-47: 2009 Optical fibres – Part 1: Measurement methods, 2009.
6. Listvin A.V., Listvin V.N., Shvyrkov D.V. *Opticheskie volokna dlya liniy svyazi* [Optical fiber for communication lines]. Moscow, LESARart Publ., 2003. 106 p. (in Russian).
7. Tsaplin A.I., Likhachev M.E. *Metody izmereniy v volokonnoy optike* [Methods of measurement in fiber optics]. Perm', PPU Publ., 2011. 227 p. (in Russian).
8. Duncan W.J., France P.W., Craig S.P. The Effect of Environment on the Strength of Optical Fiber. In: *Proc. of NATO Advanced Research Workshop on Strength Inorganic Glass*, Algarve, 1983. 19 p.