

УДК 537.591+523.165

**ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАСТИКОВЫХ
ОПТОВОЛОКОННЫХ КАБЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХСЯ
В КАЛИБРОВОЧНЫХ СИСТЕМАХ
КОСМОМИКРОФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

© 2011 г. Р. В. Васильев*, Б. К. Лубсандоржиев*, **, Н. Б. Лубсандоржиев*,
Б. А. М. Шайбонов*, Р. Grabmayr**, J. Jochum**, F. Ritter**

*Институт ядерных исследований РАН

Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

**Kepler Center for Astro and Particle Physics, University of Tübingen

Auf der Morgenstelle 14, D-72076 Tübingen, Germany

Поступила в редакцию 14.07.2010 г.

Представлены результаты исследования оптических свойств широко используемых в космомикрoфизических экспериментах пластиковых оптоволоконных кабелей. Изучены поглощение наносекундных световых импульсов и дисперсия света, а также влияние механических изгибов кабелей и углов входа фотонов на время прохождения и ослабление световых сигналов в таких кабелях.

Пластиковые оптоволоконные кабели находят широкое применение в космомикрoфизических экспериментах. Например, в глубоководных нейтринных экспериментах, а также в черенковских детекторах широких атмосферных ливней и в черенковских вето-детекторах низкофоновых нейтринных экспериментов пластиковые оптоволоконные кабели используются во временных и амплитудных калибровочных системах.

Для эффективного использования таких кабелей необходимо знать их оптические параметры, а также влияние внешних воздействий на эти параметры. Ранее показывалось как гидростатическое давление влияет на оптические параметры оптоволоконных кабелей [1]. Кроме того, во время монтажа и окончательной фиксации всех элементов экспериментальной установки оптоволоконные кабели могут быть подвержены различным механическим деформациям: растяжениям и изгибам. Если растяжения кабелей можно как-то контролировать и не допустить в окончательной конфигурации детектора, то от изгибов кабелей практически никуда не уйти. Поэтому важно знать влияние изгибов и длины кабелей для того, чтобы избежать существенных изменений параметров кабелей или же ввести соответствующие поправки в результаты калибровочных измерений.

Исследование оптических параметров оптоволоконных кабелей проводилось с помощью измерительного стенда, функциональная схема которого показана на рис. 1. В измерениях использовалась система многомодовых пластиковых оптоволоконных кабелей марки CUPOFLEX SERCOS-CU-

POFLEX-LWL CL11Y-1V2Y1P 980/1000 200A производства фирмы Siemens и COMAR 01 FS 20 фирмы Comar Optics с сердцевиной из полиметилметакрилата \varnothing 960 мкм и внешней оболочки толщиной \sim 20 мкм. Эта система аналогична системам, которые используются в Байкальском нейтринном эксперименте [2, 3], черенковских детекторах широких атмосферных ливней ТУНКА и QUEST [4, 5] и черенковском детекторе мюонного вето подземного нейтринного эксперимента GERDA [6, 7] по поиску двойного безнейтринного бета-распада ядра ^{76}Ge . Все кабели объединены с одного конца в единую планшайбу ПШ, при этом торцы кабелей в планшайбе тщательно отполированы.

В составе измерительного стенда применялись источники наносекундных световых импульсов ИС на основе светодиодов и лазерных диодов. Диапазон максимумов спектров излучения этих источников простирается от 380 до 700 нм, а ширина спектров от 8 до 15 нм. Формирователи импульсов запуска светодиодов были выполнены либо на лавинных транзисторах [8–10], либо на комплементарных парах быстродействующих транзисторов [11, 12]. Длительность световых импульсов контролировалась и не превышала 1 нс (п.ш.п.в. – полная ширина на половине высоты). Для равномерной засветки оптоволоконных кабелей в планшайбе световые импульсы проходят через диффузный рассеиватель света ДР. Для того, чтобы на торцы кабелей в планшайбе падала практически плоская световая волна, планшайба установлена на расстоянии \sim 1 м от рассеивателя. Планшайба, рассеиватель и источник световых импульсов за-

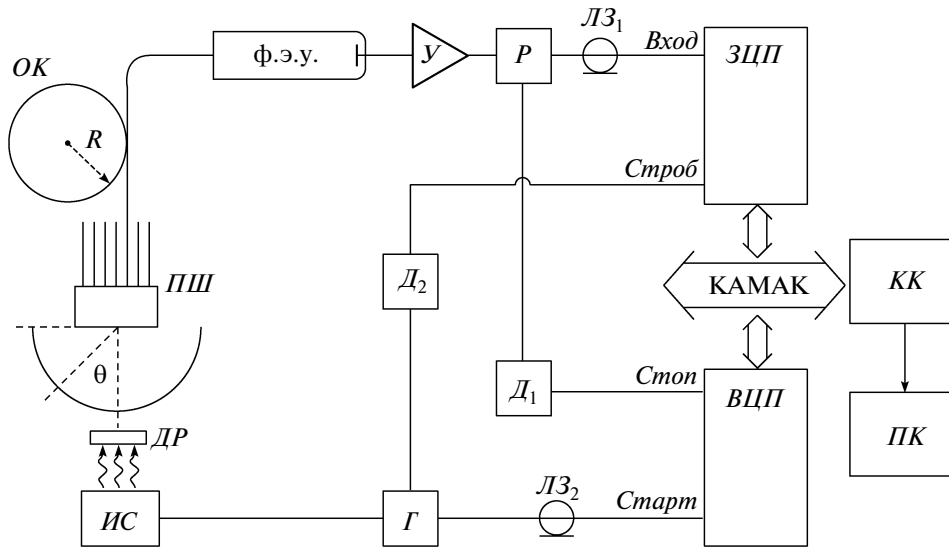


Рис. 1. Функциональная схема измерительного стенда. ОК – оптоволоконный кабель; ИС – источник световых импульсов наносекундной длительности; ДР – диффузный рассеиватель света; ПШ – планшайба; ф.э.у. – фотоэлектронный умножитель XR2020; У – усилитель импульсов LeCroy 612AM; Р – линейный разветвитель импульсов LeCroy 428F; Д₁ – дискриминатор-формирователь со следящим порогом Sanberga CFD 1326D; Д₂ – дискриминатор импульсов с фиксированным порогом LeCroy 621AL; ЛЗ₁, ЛЗ₂ – линии задержки; Г – генератор импульсов Stanford DG535; ЗЦП – зарядово-цифровой преобразователь LeCroy 2249A; ВЦП – время-цифровой преобразователь БПТ-12А1; КАМАК – крейт-контроллер КАМАК КК009; ПК – персональный компьютер.

крепляются на единой платформе. Источник света и рассеиватель могут перемещаться, изменяя угол падения фотонов на планшайбу, а следовательно, и угол входа θ фотонов в оптоволоконный кабель.

В измерениях используется только один из оптоволоконных кабелей системы. Для измерения влияния изгиба кабеля на распространение световых импульсов наматывается один виток исследуемого оптоволоконного кабеля на металлические цилиндры различных радиусов R . При измерениях зависимости длительности и амплитуды световых сигналов от длины оптоволоконного кабеля ОК используются кабели разной длины: 1, 10, 30, 60, 90 и 120 м. Световые сигналы после прохождения кабеля регистрируются быстродействующим фотоэлектронным умножителем XR2020.

Для измерения ослабления светового сигнала в оптоволоконном кабеле используется десятиразрядный зарядово-цифровой преобразователь ЗЦП LeCroy 2249A. В измерениях времени прохождения сигнала в кабеле применяется широкодиапазонный время-цифровой преобразователь ВЦП БПТ-12А1 с шагом 75 пс и диапазоном 5 мкс. Для определения абсолютных значений времени прохождения сигнала в кабеле были измерены временные задержки в ф.э.у. и электронных блоках (усилителе, дискриминаторах и т.д.) с помощью быстродействующего $p-i-n$ -фотодиода Hamamatsu S1226.

Зависимость времени прохождения светового сигнала от длины оптоволоконного кабеля при-

ведена на рис. 2. Скорость распространения наносекундных световых сигналов в кабеле на длине волны 470 нм составляет ~ 5.3 нс/м. При этом длительность светового сигнала увеличивается с длиной кабеля со скоростью ~ 80 пс/м. На рис. 3 приведена измеренная зависимость длительности световых импульсов от длины оптоволоконного кабеля. В этих измерениях использовался источник световых импульсов длительностью ~ 0.75 нс (п.ш.п.в.) и с максимумом излучения на длине волны $\lambda_{\max} \sim 470$ нм. Постепенное увеличение длительности светового сигнала при его распро-

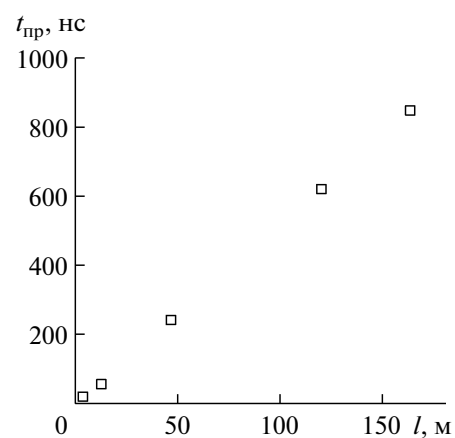


Рис. 2. Зависимость времени прохождения наносекундных световых импульсов $t_{пр}$ от длины оптоволоконного кабеля l .

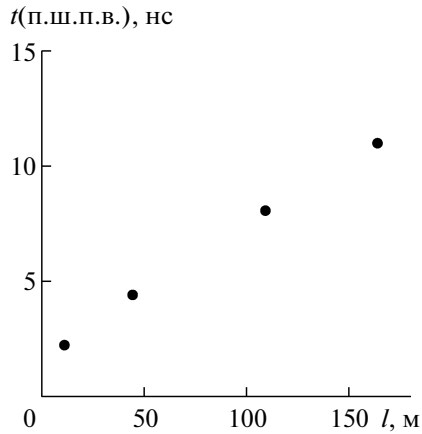


Рис. 3. Зависимость длительности световых импульсов t от длины оптоволоконного кабеля L .

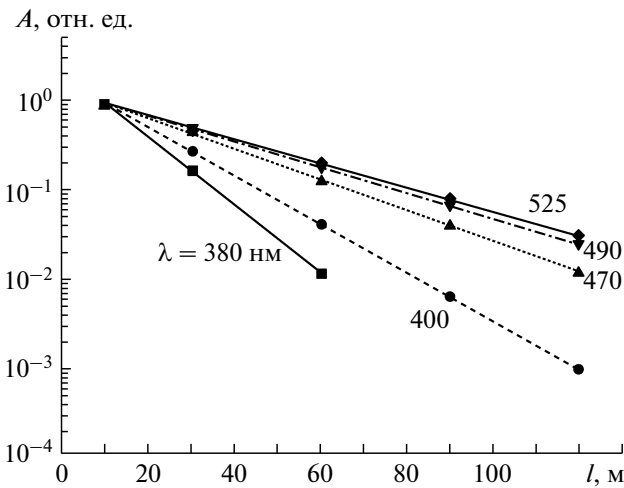


Рис. 4. Зависимость амплитуды световых импульсов A от длины оптоволоконного кабеля L для различных длин волн λ .

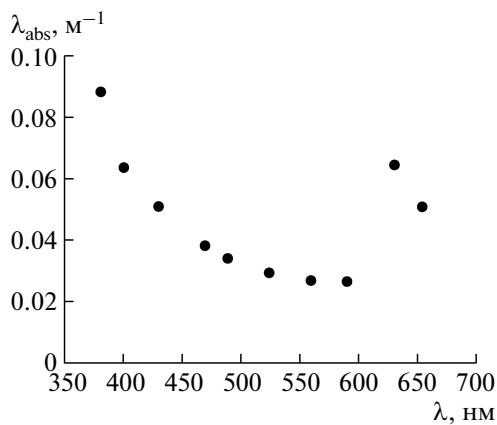


Рис. 5. Зависимость коэффициента поглощения λ_{abs} наносекундных световых импульсов в оптоволоконном кабеле от длины волны λ .

странении по кабелю обусловлено как геометрической (модовой), так и хроматической дисперсией света в кабеле. Хроматическая дисперсия света возникает из-за зависимости показателя преломления сердцевины кабеля от длины волны. Прямые измерения хроматической дисперсии исследуемых оптоволоконных кабелей с помощью набора светодиодов, излучающих на различных длинах волн, дают величину ~ 10 пс/(м · нм).

Ослабление световых импульсов при прохождении пластиковых оптоволоконных кабелей сильно зависит как от длины кабеля, так и от длины волны света. На рис. 4 представлена зависимость амплитуды световых импульсов от длины кабеля, измеренная для различных длин волн света. Как видно из рис. 4, амплитуда световых импульсов A для каждой длины волны λ с увеличением длины кабеля L изменяется по экспоненциальному закону:

$$A(l, \lambda) = C \exp(-l/L_{att}), \quad (1)$$

где C — нормировочная постоянная; L_{att} — длина поглощения световых импульсов.

С увеличением длины волны света наблюдается постепенное увеличение длины поглощения света от $L_{att} = 16$ м при $\lambda = 400$ нм до $L_{att} = 40$ м при $\lambda = 590$ нм. Параметр L_{att} связан с коэффициентом поглощения света λ_{abs} простым соотношением

$$L_{att} = (\lambda_{abs})^{-1}. \quad (2)$$

На рис. 5 показано как коэффициент поглощения наносекундных световых импульсов зависит от длины волны. Минимальное ослабление светового сигнала достигается в диапазоне длин волн 530–600 нм. Интересно, что наблюдается резкий рост ослабления сигнала в области длин волн 620–650 нм, причем ослабление сигнала в этой области приблизительно равно ослаблению сигнала в фиолетовой области спектра. К сожалению, нам не удалось изучить более тщательно эту область повышенного поглощения из-за ограниченных наборов доступных светодиодов и светофильтров. С другой стороны, увеличение ослабления световых сигналов в этом диапазоне длин волн не столь существенно для большинства космомикрофизических экспериментов, использующих преимущественно фотодетекторы с чувствительностью в фиолетово-сине-зеленой области спектра. Таким образом, для калибровочных систем космомикрофизических экспериментов, использующих такие оптоволоконные кабели, необходимо применять источники света с максимумом излучения в диапазоне длин волн 450–500 нм, где ослабление сигнала относительно мало, а чувствительность фотодетекторов еще достаточно высока. Следует отметить, что сине-зеленые светодиоды с максимумом излучения на длинах волн 490–500 нм, несмотря на их большую яркость, характеризуются замедленной кинетикой свечения с длительностью световых импульсов 5–10 нс (п.ш.п.в.) и постоянной времени свечения

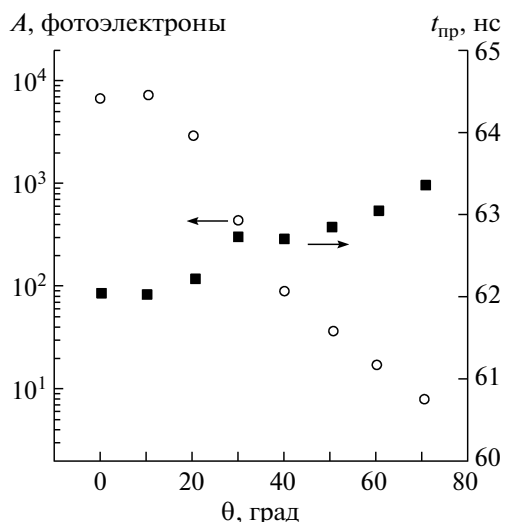


Рис. 6. Зависимости амплитуды A и времени прохождения $t_{пр}$ наносекундных световых сигналов от угла входа θ фотонов в оптоволоконный кабель.

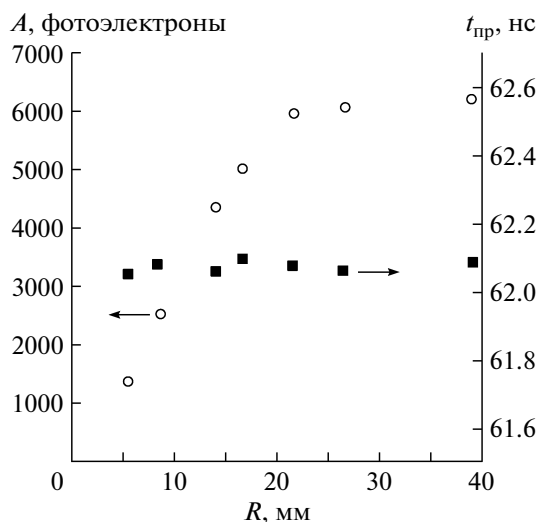


Рис. 7. Зависимости амплитуды A и времени прохождения $t_{пр}$ наносекундных световых сигналов от радиуса изгиба R оптоволоконного кабеля.

$\tau \geq 10$ нс, что существенно ограничивает их использование в системах калибровки точности измерения времени [13, 14]. В силу этого представляется оптимальным использование для таких целей голубых светодиодов с максимумом излучения на длине волны ~ 470 нм, где длина поглощения находится еще вполне на приемлемом уровне и составляет $L_{att} \sim 26$ м, а длительность световых импульсов ≤ 1 нс при высоком световыходе.

В калибровочных системах используются источники света, излучающие в достаточно широком угле, т.е. фотоны могут входить в кабель под разными углами. Время прохождения и длительность световых импульсов в оптоволоконных кабелях зависят от того, под какими углами входят фотоны в кабель. На рис. 6 представлены зависимости амплитуды A и времени прохождения $t_{пр}$ световых сигналов от угла входа θ сигналов в оптоволоконный кабель. Амплитуда светового сигнала при увеличении угла θ начинает резко падать при углах, превышающих $\sim 10^\circ$, а при углах $\geq 40^\circ$ уменьшение амплитуды сигнала замедляется. В диапазоне углов $10^\circ < \theta < 40^\circ$ зависимость амплитуды светового сигнала от угла входа фотонов в кабель аппроксимируется экспоненциальной функцией $A \sim \exp(-\theta/\theta_1)$, где $\theta_1 = 6^\circ$. При $\theta \geq 40^\circ$ эта зависимость идет уже по другому экспоненциальному закону $A \sim \exp(-\theta/\theta_2)$ с $\theta_2 = 10^\circ$. Амплитуда светового сигнала уменьшается в ~ 870 раз при переходе от $\theta = 0^\circ$ к $\theta = 70^\circ$, при этом время прохождения светового сигнала $t_{пр}$ в кабеле увеличивается всего лишь на 1.5 нс с ростом θ от 0 до 70° .

На рис. 7 приведены зависимости амплитуды A и времени прохождения $t_{пр}$ световых сигналов от радиуса изгиба R оптоволоконных кабелей. Как видно из этого рисунка, время прохождения сиг-

налов практически не зависит от радиуса изгиба кабеля, тогда как заметное ослабление амплитуды сигнала начинается при $R < 20$ мм. При однократном изгибе радиусом $R \sim 5$ мм данного оптоволоконного кабеля амплитуда светового сигнала уменьшается в ~ 5 раз.

На практике при окончательном монтаже калибровочных систем излишки кабелей укладываются в бухты со средним радиусом ~ 20 см. В этом случае амплитуда наносекундного светового сигнала уменьшается на 0.14% на один виток по сравнению с прямым кабелем. При этом время прохождения сигнала через кабель увеличивается с коэффициентом 10.4 пс/виток. Измерения проводились с оптоволоконным кабелем длиной 118 м, который наматывался на барабан $\varnothing 40$ см. Строго говоря, измерения велись не относительно прямого кабеля, а кабеля с очень малым изгибом (кабель описывал окружность радиусом ~ 19 м).

Таким образом, при проектировании прецизионных калибровочных систем космофизических экспериментов с использованием пластиковых оптоволоконных систем необходимо учитывать особенности прохождения световых сигналов в таких кабелях, а также влияние внешних механических воздействий на оптические параметры кабелей.

Авторы считают своим приятным долгом выразить искреннюю признательность Л.Б. Безрукову за постоянную поддержку на всех этапах данной работы и В.Ч. Лубсандоржиевой за внимательное прочтение рукописи статьи и многочисленные ценные обсуждения и замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев Р.В., Лубсандоржиев Б.К., Похил П.Г., Streicher O. // ПТЭ. 2003. № 1. С. 77.
2. Belolaptikov I.A., Bezrukov L.B., Borisovets B.A. et al. // Astroparticle Physics. 1997. V. 7. P. 263.
3. Васильев Р.В., Вятчин Е.Э., Лубсандоржиев Б.К. и др. // ПТЭ. 2008. № 2. С. 21.
4. Васильев Р.В. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., ИЯИ РАН. 2005. 189 с.
5. Koresteleva E., Kuzmichev L., Lubsandorzhev B. et al. // Int. J. Mod. Phys. 2005. V. A20. P. 6837.
6. Knapp M., Grabmayr P., Jochum J. et al. // Nucl. Instrum. and Methods A. 2009. V. 610. P. 280.
7. Ritter F., Lubsandorzhev B., Freund K. et al. // Nucl. Instrum. and Methods A. 2010. V. 617. P. 420.
8. McFarlane W.K. // Rev. Sci. Instrum. 1974. V. 45. № 2. P. 286.
9. Васильев Р.В., Лубсандоржиев Б.К., Похил П.Г. // ПТЭ. 2000. № 4. С. 148.
10. Вятчин Е.Э., Лубсандоржиев Б.К. // ПТЭ. 2004. № 4. С. 80.
11. Kapustinsky J.S., DeVries R.M., DiGiacomo N.J. et al. // Nucl. Instrum. and Methods A. 1985. V. 241. P. 612.
12. Lubsandorzhev B., Vyatchin Y. // J. of Instrumentation. 2006. 1. T06001.
13. Вятчин Е.Э. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., ИЯИ РАН. 2006. 167 с.
14. Лубсандоржиев Б.К., Вятчин Е.Э., Шайбонов Б.А. // Труды 7-й Всероссийской конференции “Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы”. 1–3 февраля 2010 (МГУ им. М.В. Ломоносова, физфак). СПб.: ФТИ РАН, 2010. С. 226.