

УДК 535.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ПРОПУСКАНИЯ КВАРЦЕВОГО ВОЛОКНА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СТАЦИОНАРНОГО И ИМПУЛЬСНОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

А.В. Андрияш (1), А.Н. Афанасьев (1), В.Б. Братчиков (1),
А.В. Домбровский (1), М.А. Егоров (1), В.М. Жабунин (1), Н.Е. Жиравова (1),
Э.В. Моисеенко (1), Н. А. Морозов (1), В.О. Панюшкина (1),
Е.В. Плотникова (1), А.Е. Ремезов (1), Е.Б. Хатунцев (1),
Л.А. Мялицин (2), В.Б. Гаврилов (3), В.Л. Столин (3)
e-mail: c5@five.ch70.chel.su

(1) Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский НИИ технической физики,
им. акад. Е.И. Забабахина, г. Снежинск, Россия

(2) Снежинская Государственная физико-техническая Академия, г. Снежинск, Россия

(3) Институт теоретической и экспериментальной физики, г. Москва, Россия

Статья поступила 1 декабря 2003 г.

Введение

Активной частью переднего калориметра установки CMS (Compact Muon Solenoid), который будет использоваться в экспериментах на большом адронном коллайдере LHC (Large Hadron Collider, Церн) являются оптические кварцевые волокна, пронизывающие поглотитель из стали. При этом волокна располагаются продольно, в направлении близком к направлению сталкивающихся частиц. Регистрируемые сигналы вызываются черенковским излучением, возникающим в кварцевых волокнах при воздействии частиц.

Поскольку энергетическое разрешение калориметра определяется уровнем сигнала, вызванного черенковским излучением, а интенсивность этого излучения растет обратно пропорционально длине волны, то естественно использовать оптическое излучение возможно более коротких длин волн. Использование в этом смысле чистого кварца в качестве передающей среды перспективно, поскольку необлученный кварц является прозрачным для большей части черенковского излучения. Одним из факторов, ограничивающих использование кварца, является наведенное под действием ионизирующего излучения поглощение.

Увеличение оптического поглощения при облучении в целом является результатом ионизации вещества волокна. Под воздействием ионизирующего излучения разрушаются электронно-химические связи, образующие матрицу стекла. В результате образуются новые уровни энергии электронов, между которыми возможны электронные переходы. Многие из этих переходов создают дополнительные полосы поглощения или излучения в соответствующих областях спектра [1]. Известно, что наиболее стойкими к радиационному излучению являются волокна с чистой кварцевой сердцевиной. При этом в качестве оболочки может быть кварц, легированный фтором, а также полимерные материалы.

Основной целью исследований было проведение испытаний волокна с чистой кварцевой сердцевиной в радиационных условиях близких к дозовым нагрузкам на переднем калориметре, оценка уровней наведенного поглощения и люминесценции, определение наиболее стойких к радиационному воздействию спектральных областей [2].

1. Постановка экспериментов

Первая серия опытов проводилась на испытательном стенде «ИС–1» (РФЯЦ — ВНИИТФ, г. Снежинск), предназначенном для облучения различных материалов и препаратов. Облучатель установки ИС–1 представляет собой источник гамма–излучения с радионуклидом Co^{60} ($E_\gamma = 1,2$ МэВ), помещенным в капсулу из нержавеющей стали. Дозовое поле, создаваемое источником ионизирующего излучения установки, коаксиально симметрично по отношению к оси источника.

Эксперименты проводились в следующей постановке. Кольцо испытуемого кварцевого волокна располагалось горизонтально вокруг стержневого источника гамма–излучения установки «ИС–1» (рис. 1). Входной и выходной концы исследуемого волокна выводились из области воздействия рассеянного гамма–излучения и подсоединялись к вспомогательным волокнам длиной ~ 20 м, подстыкованным к монохроматору и фотоприемнику. Детектирование оптического сигнала, модулированного с помощью механического прерывателя, производилось фотоэлектронным умножителем ФЭУ–100.

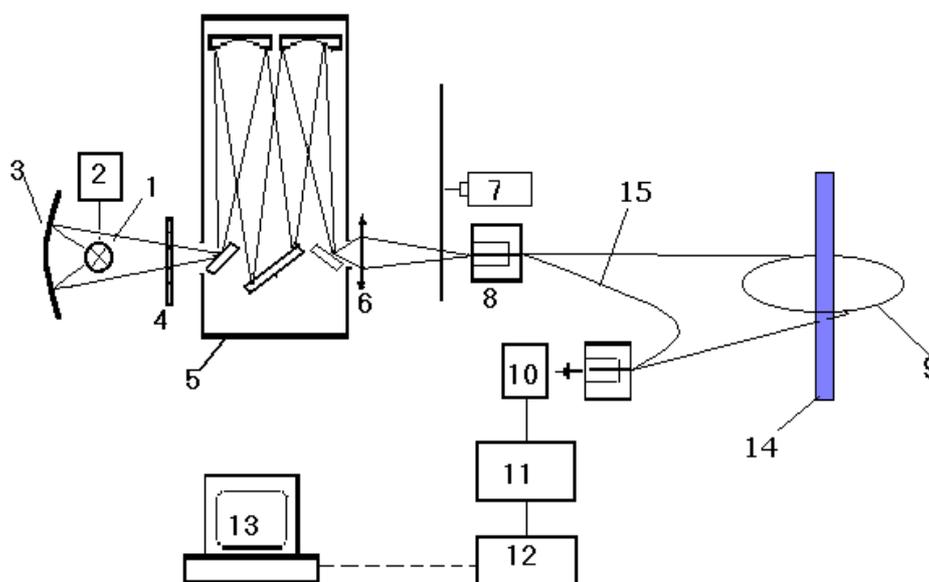


Рис. 1. Схема проведения экспериментов по регистрации спектров поглощения кварцевого волокна при воздействии стационарного гамма–излучения:

1 — галогенная лампа; 2 — стабилизированный источник питания; 3 — сферическое зеркало; 4 — светофильтр, 5 — монохроматор; 6 — кварцевая линза; 7 — модулятор; 8 — узлы крепления и юстировки волокна; 9 — исследуемое волокно; 10 — фотоприемник; 11 — вольтметр; 12 — осциллограф; 13 — ПЭВМ; 14 — гамма–источник; 15 — опорное волокно

Коэффициент спектрального поглощения на каждый момент времени рассчитывался по формуле:

$$\alpha(\lambda) = \frac{10}{L} \cdot \lg \frac{I_2(\lambda)}{I_1(\lambda)} \text{ [дБ/м]}, \quad (1)$$

где L — длина облучаемой части волокна, λ — длина волны, I_1 — амплитуда сигнала во время облучения, I_2 — амплитуда сигнала до облучения.

Для обеспечения мощности дозы ~ 100 Р/с и ~ 10 Р/с диаметры кольца облучаемой части волокна были 11 см и 50 см соответственно. Часть длины волокна, находящаяся вне кольца,

экранировалась от прямого гамма-излучения свинцовой защитой толщиной ~ 10 см. Мощность дозы рассеянного излучения за защитой не превышала $0,3...0,5$ Р/с. Длина облучаемой части волокна определялась с учетом снижения дозы облучения на концах. Для контроля стабильности оптоэлектронного тракта использовался опорный канал, представляющий собой оптическое волокно, включенное в измерительную систему, но не подвергающееся облучению.

Измерения поглощения в спектральном диапазоне $250...700$ нм проводились непосредственно в процессе облучения при мощности дозы ~ 10 Р/с до 10 Мрад и при мощности дозы ~ 100 Р/с до 100 Мрад. Затем, после остановки облучения в течение 200 часов проводилось измерение остаточного наведенного поглощения. Исследовалось 6 образцов оптического волокна с сердцевиной из чистого кварца с диаметрами сердцевины и оболочки $310/320$ мкм. Материалом светоотражающей оболочки был кварц, легированный фтором. Содержание гидроксила OH^- в сердцевине составляло ~ 1000 ppm.

2. Экспериментальные результаты

Результаты измерений наведенного спектрального поглощения в волокне при мощности дозы 10 Р/с приведены на рис. 2. Все необлученные образцы имеют высокое пропускание вплоть до $200...250$ нм, где начинается подъем, обусловленный коротковолновым краем полосы поглощения кварца. При облучении дозой ~ 10 Мрад происходит резкий сдвиг края полосы поглощения до 350 нм на уровне ~ 10 дБ/м. По-видимому, резкий рост левого края обусловлен значительным усилением полос поглощения в области $200...330$ нм за счет образования известных радиационных дефектов: E' – центров, пероксирадикалов, кислородных вакансий [1, 3].

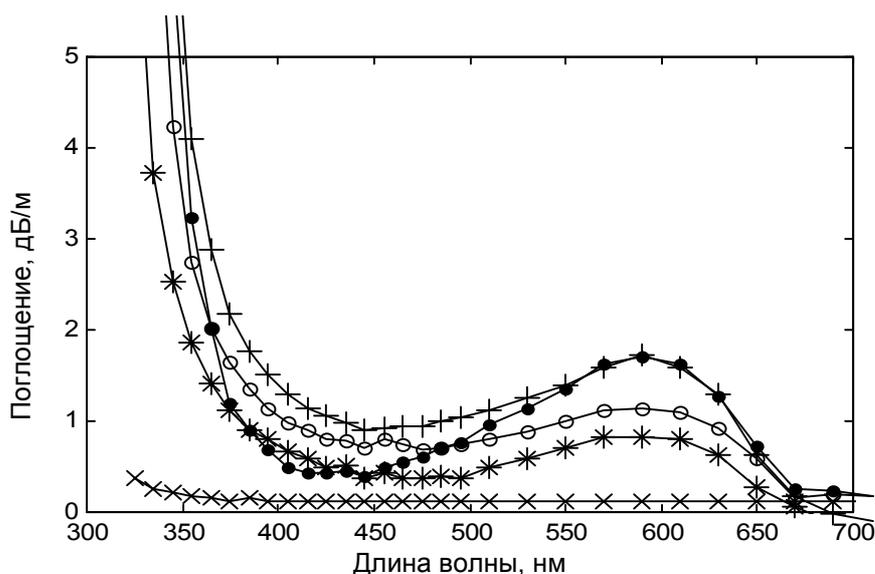


Рис. 2. Спектры поглощения кварцевого волокна при облучении мощностью дозы 10 Р/с:

x — до облучения; * — $0,9$ Мрад; о — $3,4$ Мрад; + — 10 Мрад; • — восстановление через 200 часов после облучения

Наведенное поглощение в области $420\div 500$ нм, для всех волокон не превысило ~ 1 дБ/м. В области $580...650$ нм, идентифицируемой как линия поглощения радиационного дефекта «немостиковый кислород» [1,3], наведенное поглощение составило ~ 2 дБ/м. Восстановление волокон наблюдалось в течение 200 часов и показало, что в области ≤ 330 нм величина его незначительна. В области $360...500$ нм наведенное поглощение уменьшилось на $0,3...1$ дБ/м, в области $580...650$ нм — не более чем на $0,1$ дБ/м.

Облучение волокон мощностью дозы ~ 100 Р/с до 100 Мрад показало, что левый край уровня поглощения 10 дБ/м сместился до 380 нм, поглощение в области $420...500$ нм составило $1,5...2$ дБ/м (рис. 3), в области $580...650$ нм величина его достигла $4...5$ дБ/м.

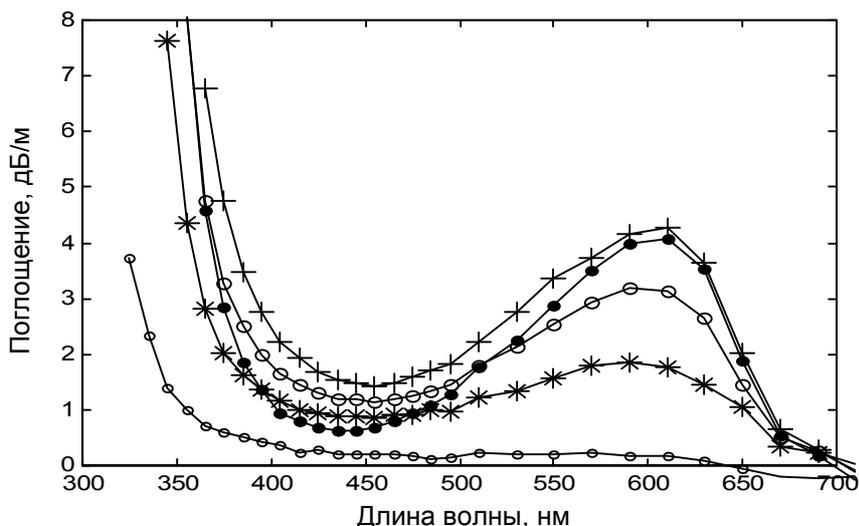


Рис. 3. Спектры поглощения кварцевого волокна при облучении мощностью дозы 100 Р/с:

○ — 0,7 Мрад; * — 10 Мрад; □ — 50 Мрад; + — 100 Мрад; ● — восстановление через 200 часов

В процессе восстановления за 200 часов наведенное поглощение уменьшилось на 1...1,5 дБ/м в области 350...500 нм и не более чем на 0,2 дБ/м в области 580...650 нм. Коротковолновый край (область <350 нм) практически не изменился.

Таким образом, наиболее чувствительными к излучению являются области ≤ 350 нм и 580...650 нм в спектральном диапазоне 250...700 нм, а наиболее устойчивая область — 360...500 нм. Наименьшее наведенное поглощение зарегистрировано в области 430...500 нм. Для регистрации возможной люминесценции в волокне, вызванной гамма-излучением мощностью дозы до 100 Р/с, измерялась мощность светового потока при выключенной лампе при воздействии гамма-излучения и без него. Значительного изменения световой мощности зарегистрировано не было (изменения в пределах шума фотоприемника).

Для исследования влияния гамма-излучения на волокно при больших импульсных мощностях были проведены опыты на установке «ИГУР-3» (РФЯЦ—ВНИИТФ, г. Снежинск). Большая мощность (до 10^{12} Р/с) здесь достигается за счет электронного торможения на материале мишени. Экспозиционные дозы в месте расположения исследуемых объектов составляют ~ 100 рад, длительность гамма-импульса — десятки наносекунд, энергия гамма-квантов — ~ 1 МэВ.

Эксперименты проводились в следующей конфигурации. Излучение светодиода с длиной волны ≈ 450 нм вводилось в волокно для создания светового опорного сигнала, другой конец подводился к фотодетектору. Середина волокна в виде петли длиной $\approx 0,5$ м располагалась в зоне воздействия гамма-излучения установки. Для регистрации сигнала использовался быстродействующий фотоприемник СНФТ-3 с временным разрешением ≤ 2 нс. С помощью штатных датчиков установки «ИГУР» регистрировалась мощность дозы облучения в центре кольца волокна, а также временная форма импульса гамма-излучения. Для исключения влияния возможных паразитных засветок волокно было помещено в светонепроницаемую полиэтиленовую оболочку. Часть волокна, вне кольца, была защищена свинцом толщиной ~ 10 см. Регистрация гамма-импульса и светового сигнала в волоконно-оптическом канале проводилась в едином временном масштабе с помощью скоростного запоминающего осциллографа TDS-220 Tektronix. На рис. 4,а приведена форма зарегистрированного гамма-импульса с помощью штатных датчиков.

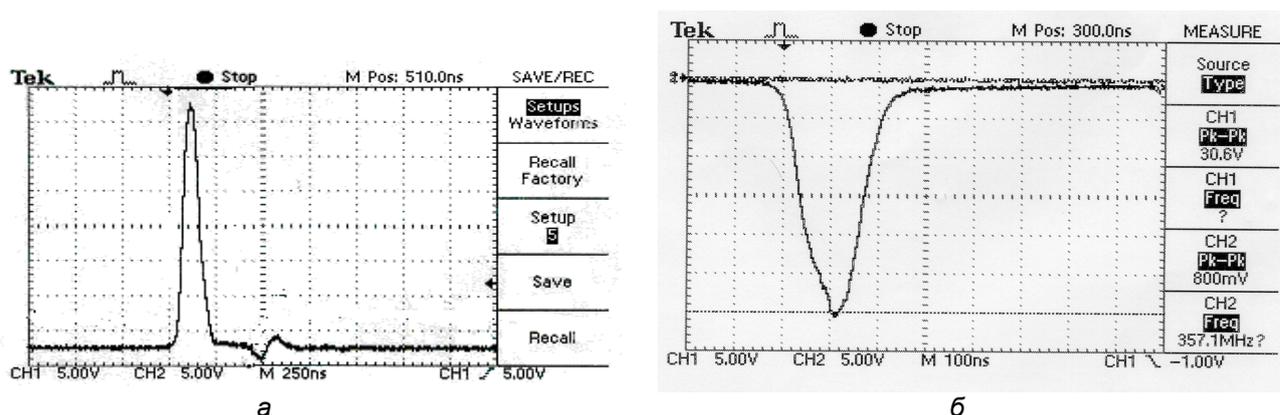


Рис. 4. Осциллограммы импульсов:

а — гамма-импульса, полученная с помощью штатного датчика: длительность гамма-импульса на полувысоте ≈ 100 нс, (развертка по времени — 250 нс/дел., по амплитуде — 5 в/дел); б — светового импульса, полученная с помощью фотопреобразователя СНФТ-3: длительность импульса на полувысоте ≈ 100 нс, (развертка по времени — 100 нс/дел., по амплитуде — 5 в/дел)

Экспозиционная доза составила ≈ 40 рад, мощность $P \approx 0,5 \cdot 10^9$ Р/с. Согласно осциллограмме длительность импульса на полувысоте составила ≈ 100 нс. На рис.4,б приведена осциллограмма светового импульса. Было зарегистрировано, что гамма-импульс вызывает в волокне значительную люминесценцию. Форма светового импульса близка к временной форме импульса гамма-излучения (фотоприемник СНФТ-3 выдает инвертированный сигнал). Уровни проходящего по волокну опорного сигнала до и после гамма-импульса практически одинаковы, то есть остаточного наведенного поглощения не зафиксировано. Воздействие гамма-импульса с меньшей мощностью за счет удаления петли волокна из зоны облучения показало, что значительная люминесценция, (отношение $P_{\text{люм}}/P_{\text{сиг}} > 2$, где $P_{\text{сиг}}$ — мощность опорного сигнала, $P_{\text{люм}}$ — мощность света вследствие люминесценции) возникает при мощностях $> 10^7$ Р/с. После 20 опытов с аналогичными дозовыми нагрузками существенных изменений оптических и механических характеристик волокна зарегистрировано не было. На основании этого сделано предположение, что подобные кварцевые волокна могут служить активным элементом безинерционного детектора мощного импульсного гамма-излучения. Соответствующая калибровка датчика позволит оперативно оценивать мощность дозы гамма-излучения по величине интенсивности света, вызванного люминесценцией. Применение быстродействующих приемников и регистрирующей аппаратуры позволит прописывать форму гамма-импульса длительностью до нескольких наносекунд.

Заключение

Измерены спектры наведенного поглощения кварцевого оптического волокна при воздействии стационарного гамма-излучения мощностью дозы ~ 10 Р/с до 10 Мрад и ~ 100 Р/с до 100 Мрад. Получено, что наименее стойкими к гамма-излучению в спектральном диапазоне 250...700 нм являются области ≤ 350 нм и 580...650 нм (поглощение свыше 4...6 дБ/м), а наиболее устойчивая область — 420...500 нм, как по наведенному поглощению, так и по восстановительным свойствам (поглощение ≤ 2 дБ/м). Эксперименты показали, что при таких дозовых нагрузках при соответствующем запасе динамического диапазона сигнала возможна непрерывная передача информации по волокну длительное время. Исследования воздействия импульсного гамма-излучения мощностью дозы свыше 10^7 Р/с показали, что при этом в волокне возникает значительная люминесценция, временная форма которой близка к форме гамма-импульса. Это исключает передачу информации по волокну в течение подобного импульсного воздействия, поскольку волокно практически полностью «слепнет». Однако, при соответствующей калибровке (регистрации зависимости мощности люминесценции в волокне от мощности

гамма-излучения), по-видимому, подобные кварцевые волокна могут быть использованы в качестве безинерционного детектора мощного импульсного гамма-излучения.

Исследования выполнены при поддержке Международного научного фонда (грант №728).

Список литературы

1. В.Б. Гаврилов, М.В. Данилов, В.А. Исаев и др. Спектры поглощения волоконных световодов из чистого кварца, облученных γ -квантами от ^{60}Co // Приборы и техника эксперимента, 1997. № 4. С. 23—32.
2. Основные требования, предъявляемые к оптическим кварцевым волокнам для переднего калориметра CMS. М.: ИТЭФ, 1998.
3. Радиационная стойкость волоконно-оптических систем передачи информации// Радиоэлектроника, 1990. № 11. С. 23—26.
4. А.Н. Гурьянов, Д.Д. Гусовский, Е.М. Дианов и др. // Квантовая электроника, 1979. № 6. С. 1310—1319.