

С. В. Волков, С. И. Чубаров

## ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ДАТЧИК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

### Введение

Оптические волокна, изготовленные по золь-гель технологии, в качестве датчиков гамма-излучения обладают рядом преимуществ по сравнению с датчиками, не использующими оптическое волокно [1,3]:

- малый диаметр ( $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$  м);
- высокая эластичность (минимальный радиус изгиба составляет 2 мм);
- помехозащищенность;
- электробезопасность;
- возможность измерения от распределенного источника;
- оптические волокна выдерживают воздействие высоких температур, влажности, электромагнитного поля и химических реакций.

Существует большой класс сцинтилляционных датчиков. В качестве чувствительного элемента в них используется пластина, которая под воздействием радиоактивного излучения испускает оптический импульс. Импульсы передаются к месту регистрации с помощью оптического волокна, т. е. волокно используется только в качестве линии передач. Соответственно, несколько пересмотрев данную идею, можно создать распределенный датчик, в котором оптическое волокно будет являться одновременно и регистрирующим элементом, и линией передач.

Похожий датчик был разработан Исследовательской Лабораторией Навал в Вашингтоне (Naval Research Laboratory, Washington, DC), но остается актуальным вопрос о поиске новых материалов для их изготовления.

Изменение характеристик исследуемых стекол при облучении происходит в небольшом диапазоне. Для изготовления стекол была выбрана золь-гель технология, так как она позволяет получать особо чистые образцы с контролируемыми примесями, что облегчает анализ.

### Исследование спектров поглощения образцов кварцевого золь-гель стекла

Большое значение для разработки новых датчиков имеет исследование новых материалов для изготовления оптического волокна. Одним из возможных путей создания широкой гаммы оптических волокон с варьируемыми характеристиками представляется использование в качестве исходного материала кварцевых стекол, синтезированных по золь-гель

технологии. Основным преимуществом данной технологии является возможность легко варьировать оптические характеристики стекла, получая образцы с заданными свойствами. Эта технология так же позволяет создавать особо чистые стекла с наиболее однородным распределением примесей, число которых можно контролировать.

Для оптических измерений изготавливались образцы в виде прямоугольных параллелепипедов размером 10x10x40 мм с полированными гранями. Спектры поглощения исследуемых образцов записывались на абсорбционных спектрометрах SPECORD M-40. Исследуемые образцы облучали при комнатной температуре гамма-излучением  $Co^{60}$  (период полураспада 5,3 года, средняя энергия квантов 1,25 МэВ) на установке МРХ-гамма-25М. В рабочей зоне установки кобальтовые источники собирались в цилиндр так, что образцы облучались равномерно со всех сторон. Контроль доз облучения в диапазоне  $10^2$ - $10^7$  Гр осуществлялся дозиметром Харта. Суммарная доза облучения достигала  $10^6$  Гр. Отжиг стекол проводили при  $1000^{\circ}C$  в течение 40 мин. Спектры поглощения в видимой и УФ области характеризовались максимумами поглощения примерно при 4.85 эВ и 2.05 эВ (рис. 1).

Оптическая плотность необлученных образцов стекла  $< 0.1$  для всех образцов. При рассмотрении спектров облученного образца отмечено смещение максимума полосы поглощения при 2.05 эВ в длинноволновую область при увеличении дозы облучения. Поэтому при моделировании учитывались три полосы поглощения с максимумами при 4.85, 2.05, 1.75 эВ (215, 620, 720 нм). Поглощение при 4.85 эВ возрастает с увеличением дозы облучения. При этом положение максимума полосы поглощения сохраняется. Поглощение пропорционально дозе облучения (рис. 2), что подтверждается исследованиями авторов [4] для отжиговых характеристик оптического волокна. При изготовлении оптического волокна его поглощение становится большим [5].

### **Люминесцентные характеристики золь-гель кварцевого стекла**

Исследование спектров люминесценции проводилось в первую очередь для оценки качества изготовленных образцов. Исследуемые образцы облучали при комнатной температуре гамма-излучением  $^{60}Co$  (период полураспада 5,3 года, средняя энергия квантов 1,25 МэВ). Наибольшее внимание уделялось сравнению люминесценции для образцов, изготовленных с вариациями в технологии. Необходимо было выделить полосы ответственные за собственные (Si-O-Si), наведенные и примесные (OH, F, Si-O-NH-O-Si) дефекты. Интенсивность полос люминесценции, связанных с наведенными дефектами должна была увеличиваться. На

рис. 1 показана интенсивность люминесценции при 650 нм, обусловленная немостиковыми атомами кислорода (НАК), для исходных и облученных дозой  $10^6$  Гр образцов, энергия гамма квантов 1,9 эВ.

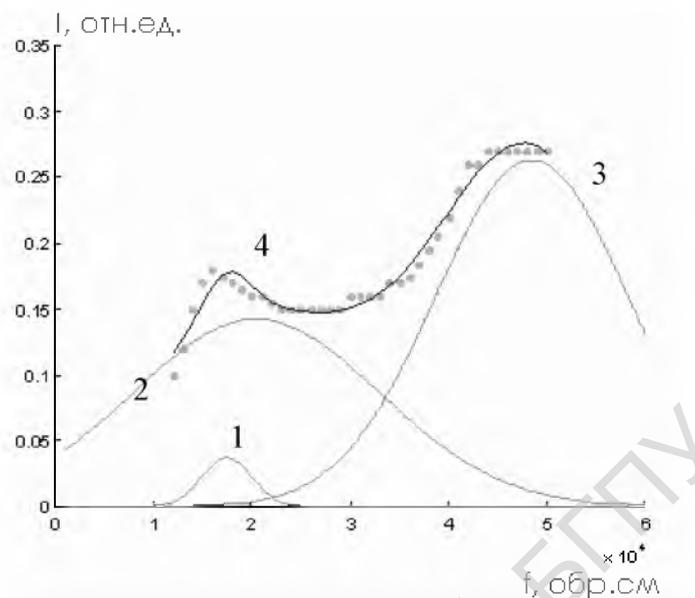


Рис. 1. Спектр поглощения образца стекла при дозе облучения  $2,4 \cdot 10^5$  Гр. (1 - полоса поглощения 1.75 эВ; 2 - полоса поглощения 2.05 эВ; 3 - полоса поглощения 4.85 эВ; 4 - суммарный спектр поглощения; • - экспериментальные данные)

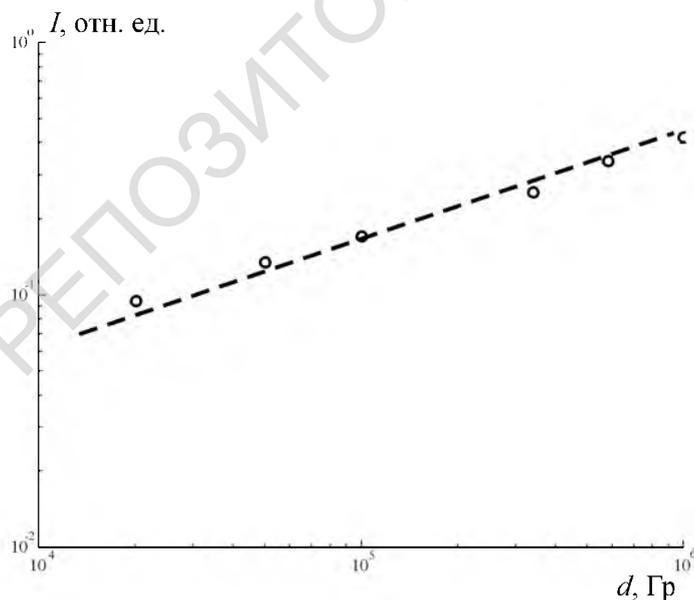


Рис. 2. Зависимость поглощения образца от дозы облучения в полосе 4,85 эВ

Из рис. 1 видно, что исключение операции фторирования спекаемых гелей (образцы 3, 4) приводит к значительному возрастанию интенсив-

ности фотолюминесценции, обусловленной НАК облученных стекол. Кроме того, в этих же образцах, содержащих максимальное количество ОН-групп (от 500 до 2000 ppm). Минимальная интенсивность люминесценции зарегистрирована для образца 6. Таким образом, наименьшую люминесценцию дают стекла, которые подвергались фторированию, и наоборот, наибольшую люминесценцию дают стекла, которые фторированию не подвергались [2].

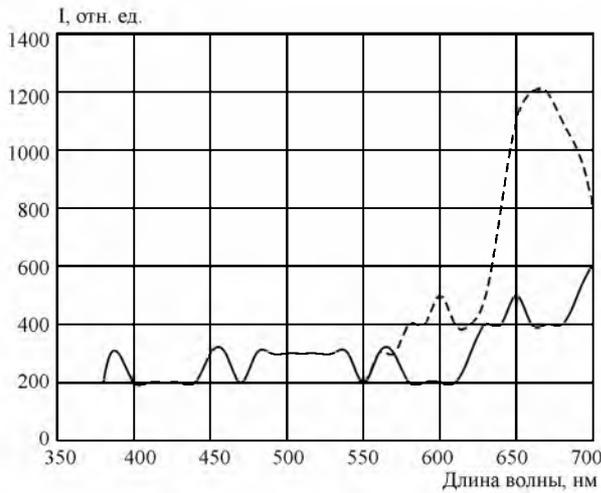


Рис. 3. Спектры люминесценции необлученного (—) и облученного дозой  $2,4 \cdot 10^5$  Гр (---) образца

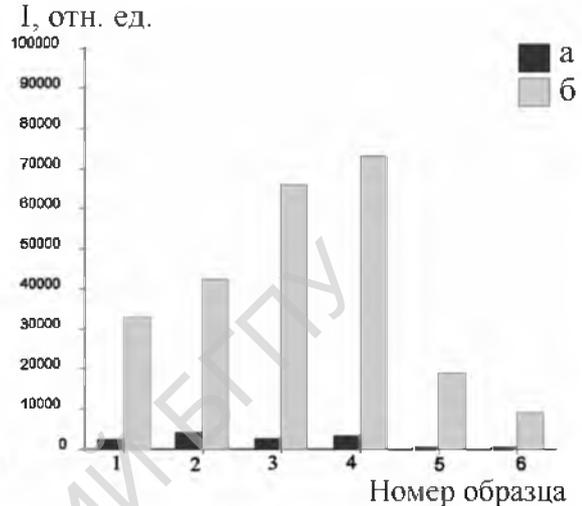


Рис. 4. Интенсивность полос люминесценции облученного (а) и необлученного (б) образцов стекол (1-6)

Так как все рассмотренные образцы содержат гидроксильные группы, можно сделать вывод, что в решетке кварцевых стекол существуют пары  $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{H}$ , и под воздействием гамма-излучения водород освобождается, и образуется дефект НАК с ОН связью по схеме



Содержание ОН-групп в исследованном образце достаточно высоко. Образец характеризуется более высоким содержанием кислорода, так как при изготовлении не подвергался обработке во фреоновой среде, в соответствии с золь-гель технологией. В результате исследований было установлено, что в спектре поглощения образца 2 существует еще одна полоса поглощения (1,75 эВ). Наиболее вероятным дефектом, ответственным за нее, является НАК, получаемый в реакции:



На основании вышеизложенного можно предложить схему энергетических уровней кварцевых стекол, которая объединяет величины частот поглощения и люминесценции для обоих типов НАК, как образованных гидроксильной связью, так и содержащих  $\equiv\text{Si}-\text{O}^-$  (рис. 2) [3,4].

Следует отметить, что во многих источниках, указываются иные значения энергетических уровней. Это связано с тем, что неупорядоченность структуры стекла приводит к появлению “хвостов” локализованных состояний в запрещенной щели, которые составляют 0,01 эВ у дна зоны проводимости и 0,17 эВ у потолка валентной зоны в энергетическом спектре электронов стеклообразного кремнезема. Такие значения по порядку величины согласуются с изменениями средней энергии кремний-кислородной связи при разбросе величин угла Si–O–Si от 120° до 180° [5]. Следует отметить, что точное положение уровней сложно определить так же из-за низкой интенсивности полос поглощения и большого среднего квадратичного отклонения.

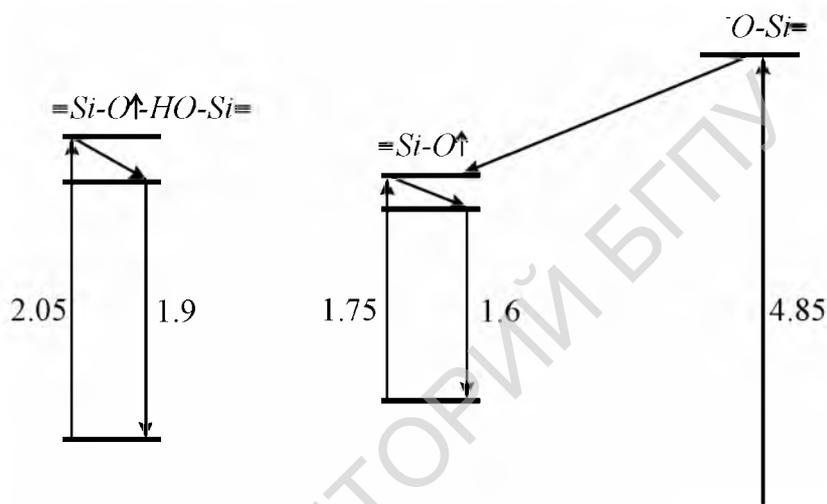


Рис. 5. Схема энергетических уровней кварцевых стекол

Так же стоит рассматривать воздействие сигнала обратного рассеяния и затухания в особой точке на потери при измерениях. Распространяясь по волокну, излучение будет взаимодействовать с различными неоднородностями, на которых будет происходить релеевское рассеяние, часть рассеянного излучения возвратится обратно к входному торцу оптического волокна.

Мощность сигнала обратного рассеяния пропорциональна коэффициенту обратного рассеяния, который главным образом зависит от диаметра модового поля, а также от материала оптического волокна и технологии его изготовления. Коэффициент обратного рассеяния может несколько различаться не только для волокон разных производителей, но и для однотипных волокон из разных партий.

### Принципиальная схема оптоволоконного датчика

Для создания датчика используется оптическое волокно, изготовленное из золь-гель стекла с большим содержанием ОН-групп. То есть стек-

ла, при изготовлении которого не проводилась операция фторирования. Для получения люминесценции на других длинах волн необходимо использовать оптическое волокно с примесями. Длительность и скважность импульсов в измерительной установке варьируется в зависимости от времени генерации люминесценции в оптическом волокне. Импульсы люминесценции, вызванные разными импульсами исходного оптического сигнала, не должны перекрываться.

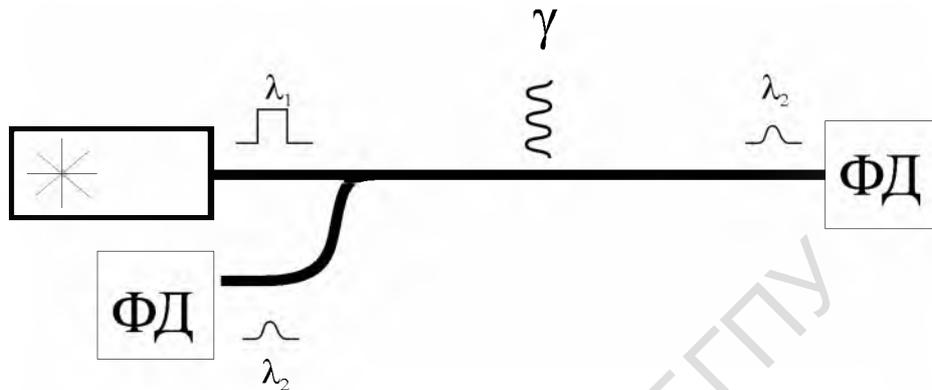


Рис. 6. Принципиальная схема оптоволоконного датчика

В местах облучения оптического волокна формируются центры поглощения типа НАК. Поглощение импульсов света этими центрами вызывает люминесценцию. Импульсы люминесценции регистрируются с двух сторон волокна [1]. По разности времени прихода этих импульсов на фотодиоды можно вычислить местоположение облученных участков.

Для повышения надежности измерений предлагается использовать дифференциальную схему датчика. Излучение лазера с длиной волны 215 нм (что соответствует полосе поглощения с максимумами при 4.85 эВ) вводится в оптическое волокно, после чего волокно разделяется сплиттером на два волокна одинаковой длины, изготовленные из одного материала. Одно из волокон помещается в среду, где необходимо измерить дозу облучения, второе находится при нормальных условиях. На выходе обоих волокон стоят фотодиоды, которые регистрируют интенсивность прошедшего излучения. Интенсивность излучения в волокне, находившемся под воздействием облучения, будет меньше за счет поглощения. Величина интенсивности в волокне, находящемся при нормальных условиях, будет служить опорной. Введение такого волокна необходимо для исключения ошибки измерения. В предложенной схеме длина волны лазера приходится на максимум поглощения материала. Однако, полоса поглощения очень широкая и в любой ее точке поглощение прямо пропорционально дозе облучения, поэтому можно использовать лазеры с длиной волны в пределах от 200 до 250 нм.

После однократного облучения тестовое волокно в каждом типе датчика необходимо привести в первоначальное состояние. Для этого волокно в лабораторных условиях отжигают в муфельной печи. Однако, это неудобно для работающей установки. Проблема отжига решается по-разному в различных условиях.

Один из путей путем решения этой проблемы – заключение волокна в оболочку из металлической сетки. При пропускании электрического тока по сетке, она будет нагревать волокно. Под воздействием температур выше 200°C, после второго отжига полосы поглощения в волокне исчезают, характеристики становятся стабильными и датчик можно использовать вновь. Вторым путем решения этой проблемы является нагрев оптического волокна с помощью мощного импульса лазерного излучения. Однако, в таком случае сложно обеспечить равномерный прогрев волокна по всей длине.

Количество отжигов практически не ограничено т. к. согласно данным исследований датчик может служить бесконечно долго, вплоть до физического разрушения волокна.

Предложенный датчик предназначен в основном для регистрации дозы излучения и определения местоположения источника. Датчик предназначен для использования в труднодоступных местах, а так же в местах, где необходим постоянный контроль дозы облучения: предприятия промышленности, медицинские учреждения, ядерная энергетика, места захоронения ядерных отходов.

#### Литература

1. Волков С. В., Янукович Т.П., Распределенные люминисцентные сенсоры гамма-излучения на основе кварцевых стекол // IV Международная конференция молодых ученых и специалистов “Оптика- 2005”. Санкт-Петербург, 2005. С. 103
2. Chubarov S.I., Volkov S. V., Yanukovich T. P. Sensors of gamma-irradiation on the basis of luminescent quartz glass with localization of source // Proc. of 1 international conference “Electronics and applied physics”. Kyiv. Ukraine. 2005. P. 18-19.
3. Волков С. В. Чубаров С.И. “Оптоволоконный сенсор гамма-излучения” // “Молодежь в науке. 2005”. Институт физики НАН Беларуси, 2005. С. 112-114.
4. R. Tohmon, Y. Shimogaichi, S. Munekuni et. al. Relation between the 1.9 eV luminescence and 4.8 eV absorption bands in high-purity silica glass // Appl. Phys. Let. 1989. Vol. 54, № 17. P. 1650–1652.
5. Силинь А. Р., Трухин А. Н. Точечные дефекты и элементарные возбуждения в кристаллическом и стеклообразном SiO<sub>2</sub>. Рига: Зинатне, 1985. 244 с.