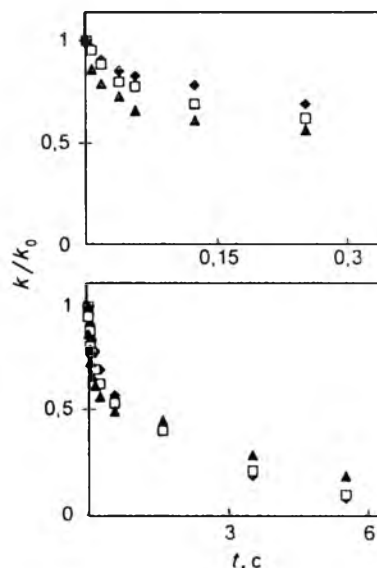


при комнатной температуре характеризуются, по меньшей мере, двумя постоянными значениями времени 100 мс и ~ 1 с. Кроме того, во всей исследованной спектральной области кинетика релаксации фотоиндуцированного поглощения носит симбатный характер. Это является еще одним подтверждением того, что короткоживущий характер исследованного фотоиндуцированного поглощения связан исключительно с термическим распадом центров окраски. Концентрация центров захвата в исследованных образцах кристалла $\text{PbWO}_4:\text{Nb}$ велика — с увеличением энергии импульса накачки наведенное поглощение также возрастает без достижения видимого насыщения (см рис. 2).

В заключение следует обратить внимание на то, что интенсивность нестационарного поглощения во всей исследованной спектральной области в 10 раз больше γ -индуцированного стабильного поглощения (при дозе облучения до 10^7 рад) [3]. Это может явиться серьезным препятствием при функционировании электромагнитного калориметра в потоке ионизирующего излучения.



Р и с. 3. Релаксация фотоиндуцированного короткоживущего поглощения в кристалле $\text{PbWO}_4:\text{Nb}$ на длине волны 340 ($\blacktriangle$), 520 ($\square$), 850 нм ($\blacklozenge$)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Compact Muon Solenoid — Electromagnetic Calorimeters Technical Design Research: CMS — ECAL TDR: CERN/LHCC 97-33, CMS TDR 4, 1997, 15 December, p. 29—45.
2. Baccaro S., Borgia B., Cavallari F. e.a. Radiation damage mechanism in PbWO_4 crystal and radiation hardness quality control of PbWO_4 scintillators for CMS. — CMS Note, 1997, N1997/038, p. 1—10.
3. Ашу́ров М.Х., Гаса́нов Э.М., Исмои́лов Ш.Х. и др. Радиационно-индуцированное оптическое поглощение в кристаллах $\text{PbWO}_4:\text{Nb}$. — Узб. физ. ж., 1999, т. 1, № 5, с. 390—396.
4. Auffray E., Dafinei J., Lecoq P. Local trap centres in PbWO_4 crystals. — CMS Note, 1994, CMS TN/94-318, p. 1—5.
5. Минков Б.И. Влияние ионизирующих излучений на оптические и лазерные свойства монокристаллов YAG:Nd . Обз. инф. М., 1985.
6. Севастьянов Б.К. Спектроскопия поглощения из возбужденного состояния ионов Cr^{3+} . — В сб.: Спектроскопия кристаллов. М.: Наука, 1975, с. 122—154.
7. Маршак. И.С. Импульсные источники света. М.: Энергия, 1978.

Поступила в Редакцию 22.05.2000

УДК 535.8.666.189.2; 539.107.8; 666.11:621.039.553

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ γ -ОБЛУЧЕННОГО ПОЛИМЕРНОГО ВОЛОКНА НА ОСНОВЕ ПОЛИСТИРОЛА

Абдурахманов Б.С., Ашу́ров М.Х., Гаса́нов Э.М., Руста́мов И.Р.,
Юлдашев Б.С., Ким Ген Чан (ИЯФ АН РУз)

Для генерации и передачи к внешним приборам диагностических сигналов из относительно недоступной области плазмы термоядерного реактора [1], области интенсивных ядерных реакций при столкновениях высокоэнергетических ядерных частиц будущих ускорителей [2] ожидается широкое использование волоконно-оптической техники. При этом, естественно, возникает проблема адекватного выделения полезного

сигнала, которое зависит от многообразия процессов, протекающих при конкретных условиях в применяемых в качестве активной среды детекторов волокон. В суммарном излучении, возникающем в волокне в поле ионизирующей радиации, наряду с черенковским излучением присутствует и люминесценция от активаторных и наведенных радиацией центров. Кроме того, на регистрируемую интенсивность света, транспортируемого волокном, существенное влияние оказывает и неединообразное поведение наведенных центров оптического поглощения. Следовательно, перечисленные процессы должны быть соответствующим образом учтены, что определяет необходимость изучения оптических характеристик волоконных световодов в процессе и после их облучения различными видами излучения. По практической применимости в различных областях среди других волоконных световодов органические сцинтиллирующие волокна занимают особое положение. Интерес к их исследованиям обуславливается тем, что эти волокна, хотя и уступают по радиационной устойчивости кварцевым [3], обладают преимуществами: быстрый отклик, гибкость, высокий световой выход и низкая стоимость.

Настоящая работа посвящена исследованию оптических характеристик γ -облученного полимерного волокна на основе полистирола.

Объект исследования и экспериментальная методика. Полимерно-органическое волокно, полученное из Лаборатории им. Э. Ферми (США) и используемое в эксперименте, представляет собой полистироловую сердцевину, окруженную оболочкой из полиметилметакрилата и внешним защитным покрытием из фторированного акрила. Диаметр сердцевины (оболочки) покрытия составляет 770/800/830 мкм. Полистироловая сердцевина активирована путем легирования 1 % *p*-терфенилом в качестве первичного и 1500 млн⁻¹ 3-гидроксифлавоном в качестве вторичного красителя. *P*-терфенил в составе полистироловой сердцевины играет роль активатора люминесценции, 3-гидроксифлавоном присутствует как спектросмещающая добавка. Полиметилметакрилатовая оболочка с меньшим по сравнению с сердцевиной показателем преломления составляет волноводно-волоконную структуру.

В процессе подготовки образцов для наблюдения фото- и рентгенолюминесценции полимерное волокно разрезали на куски длиной около 20 мм, тщательно полировали торцы и жестко закрепляли бок о бок на металлическом основании. Облучение γ -квантами ⁶⁰Со и измерение фото- и рентгенолюминесценции проводили без снятия образцов с основания. Этим обеспечивалась идентичность условий облучения и измерения. Дозовый диапазон облучения составлял от 10³ до 10⁷ Гр. Все измерения проводили при комнатной температуре в области длины волн 300—800 нм.

Для исследования спектра наведенного поглощения полимерных волокон и его временной релаксации (т.е. восстановления прозрачности в процессе отжига при комнатной температуре в темноте) были подготовлены две специальные ячейки. Каждая ячейка содержала закрепленные бок о бок одинаковое число волокон длиной по 40 мм и позволяла измерять наведенное облучением поглощение на спектрофотометре «Specord UV VIS». Спектр поглощения измеряли при комнатной температуре в диапазоне длины волн 400—750 нм и дозовом интервале 10—3,5·10⁵ Гр при мощности γ -облучения 1,2 Гр/с.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Экспериментально снятый спектр рентгенолюминесценции необлученных полимерных волокон состоит из двух хорошо различимых полос с максимумом при длине волны 390 и 540 нм (рис. 1, а). Причем интенсивность люминесценции на длине волны 390 нм намного слабее интенсивности основной полосы при 540 нм. Форма линии спектра основной полосы рентгенолюминесценции со стороны длинных волн более пологая и во всем диапазоне исследованной дозы не претерпевает существенного изменения. Начальное γ -облучение дозой 10³ Гр приводит к незначительному росту интенсивности рентгенолюминесценции основной полосы, затем она с ростом дозы монотонно уменьшается и при дозе

$3 \cdot 10^6$ Гр становится нерегистрируемой (рис. 2, а). Вторичная слабая полоса люминесценции на длине волны 390 нм существует и остается неизменной при набранной дозе до $3 \cdot 10^5$ Гр, затем она исчезает.

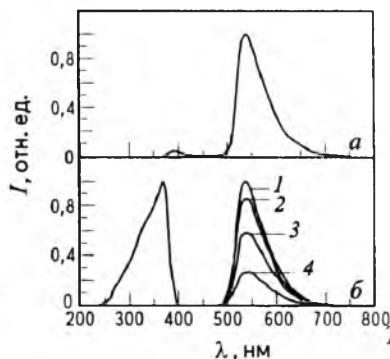
Фотолюминесценция исследуемых полимерных волокон возбуждается ультрафиолетовым светом с $\lambda = 370$ нм. Максимум полосы совпадает с максимумом основной полосы рентгенолюминесценции (540 нм). Слабая полоса люминесценции с $\lambda_{\max} = 390$ нм, наблюдаемая при рентгеновском возбуждении, в данном случае не обнаруживается либо из-за перекрытия с длинноволновым хвостом спектра фотовозбуждения, либо из-за того, что она просто не возбуждается.

Спектры фотолюминесценции и его возбуждения при нескольких значениях дозы приведены на рис. 1, б, на рис. 2, б представлена дозовая зависимость максимума.

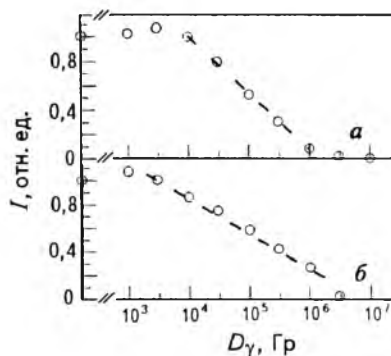
Наблюдаемые полосы фото- и рентгенолюминесценции полимерного волокна с максимумом на длине волны $\lambda_{\max} = 540$ нм обусловлены исключительно присутствием в составе полистироловой сердцевины спектросмещающего переизлучателя — 3-гидроксифлавона в виде сцинтиллирующей добавки. Это коррелирует со спектром люминесценции чистого 3-гидроксифлавона, максимум которого приходится на 540 нм [4]. Пологость обоих спектров волокон со стороны длинных волн также объясняется пологостью спектра самого 3-гидроксифлавона. Слабая полоса (390 нм) спектра рентгенолюминесценции скорее всего связана с собственной люминесценцией основы (т.е. полистирола) и первичной сцинтиллирующей добавки — *p*-терфенила. Полосы спектров люминесценции с максимумами в области около 330 нм простираются до 400 нм и в сочетании с изменениями спектра прозрачности полистирола (при длине волны более 360 нм) могут объяснить присутствие слабой полосы свечения 390 нм.

Дозовые зависимости спектров полимерных волокон показывают, что при начальном γ -облучении дозой 10^3 Гр наблюдается небольшой рост максимума люминесценции. Это небольшое увеличение интенсивности люминесценции можно связать с частичным восстановлением оптимального соотношения концентрации первичного и вторичного красителей, нарушенного на технологическом этапе вытяжки волокна (по меньшей мере на границе раздела сердцевина—оболочка) из-за образования ассоциативных центров с малой энергией связи. Первое же воздействие облучения разрушает эти ассоциативные центры, увеличивая тем самым число эффективно работающих центров люминесценции, в результате чего незначительно возрастает интенсивность люминесценции. С дальнейшим увеличением дозы облучения интенсивность падает, и полное радиационное разрушение центров люминесценции происходит при большой дозе — более чем $3 \cdot 10^6$ Гр. Для сравнения отметим, что уже при дозе $2 \cdot 10^5$ Гр отсутствует общее восстановление оптических свойств волокон на основе поливинилтолуола, облученных электронами энергией 16 МэВ [5].

Наблюдаемое уменьшение интенсивности люминесценции с ростом дозы является результатом совместного действия процессов разрушения люминесцентных центров



Р и с. 1. Спектры рентгенолюминесценции необлученного (а) и фотолюминесценции γ -облученного дозой 0 (1), 10^4 (2), 10^5 (3), 10^7 Гр (4) полимерного волокна и его спектр фотовозбуждения (б)



Р и с. 2. Дозовые зависимости рентгено- (а) и фотолюминесценции полимерного волокна (б)

и образования центров окраски, приводящих к увеличению наведенного поглощения. Поведение дозовой зависимости интенсивности максимума люминесценции хорошо описывается выражением

$$I/I_0 = 1 - A \lg(D_\gamma/D_0),$$

где I/I_0 — относительная интенсивность максимума люминесценции; D_γ — набранная доза γ -облучения; A , D_0 — постоянные величины, по крайней мере для дозового диапазона 10^4 — 10^6 Гр. Такая зависимость наблюдалась при электронном облучении органического сцинтиллирующего волокна на основе поливинилтолуола [5].

При сравнении дозовых зависимостей обнаруживается более быстрый спад интенсивности рентгенолюминесценции по сравнению с фотолюминесценцией (сравните наклоны прямых на рис. 2, а и б). Это, по-видимому, связано с большим вкладом наведенного поглощения в случае рентгеновского возбуждения люминесценции вследствие образования короткоживущих (от долей до нескольких десятков секунд) центров окраски, которые отсутствуют в случае фотовозбуждения.

Характерная особенность процессов, имеющих место в полимерах, заключается в том, что они протекают не мгновенно, а требуют значительных промежутков времени, измеряемых иногда месяцами. Такая особенность находит свое подтверждение и в

результатах исследования изменений с течением времени спектров наведенного поглощения γ -облученных полимерных волокон. На рис. 3 представлен спектр наведенного поглощения полистиролового волокна, снятый при разной дозе γ -облучения, и релаксация спектра в течение времени отжига при комнатной температуре. В этих спектрах не учтен вклад в наведенное поглощение от короткоживущих центров окраски, так как спектр после каждого набора дозы измеряли через 5—6 мин. Достоверный и повторяемый от измерения к измерению спектр удалось получить в диапазоне длины волны от 400 до 750 нм. Из рис. 3 видно, что γ -облучение полистироловых волокон малой дозой (до $3 \cdot 10^3$ Гр, кривые а, б, в, г) вносит незначительное дополнительное поглощение. При наборе следующей дозы, равной 10^4 Гр (кривая д) происходит существенный рост поглощения (оптическая плотность превышает 1,4 в области 400—450 нм). С течением времени наведенное поглощение уменьшается (кривые д, 1—10) и приблизительно через 17 ч почти достигает исходного. Дальнейшее облучение порождает все больше полос поглощения (кривые е, ж), которые при дозе $\sim 5 \cdot 10^5$ Гр сливаются, перекрывая весь исследованный диапазон длины волн, т.е. во всем диапазоне оптическая плотность становится

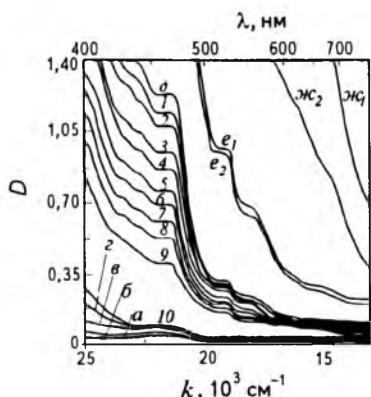


Рис. 3. Спектры наведенного поглощения полимерного волокна при дозе облучения 10 (а), 10^2 (б), 10^3 (в), $3 \cdot 10^3$ (г), 10^4 (д), $2,4 \cdot 10^4$ (е₁), $2,4 \cdot 10^4$ (е₂ через 2 ч), $2,7 \cdot 10^5$ (ж₁), $2,7 \cdot 10^5$ Гр (ж₂ через 3 ч) и релаксация спектра с течением времени. Цифры у кривых соответствуют времени, через которое измерен данный спектр после измерения спектра (д): 1—9 — 2, 4, 8, 10, 14, 24, 35, 50, 80 мин; 10 — 17 ч

больше 1,4. Следует также отметить, что при наборе дозы γ -облучения $\sim 5 \cdot 10^4$ Гр и более спектр наведенного поглощения изменяется необратимо, т.е. уже не возвращается к исходному уровню по истечении определенного времени.

Закключение. Экспериментальное исследование спектров рентгено- и фотолюминесценции и релаксация спектра наведенного поглощения γ -облученных в диапазоне дозы 0— 10^7 Гр органических сцинтилляционных волокон на основе полистирола показали, что уменьшение интенсивности люминесценции составляет менее чем 15% до набора дозы 10^4 Гр. С дальнейшим ростом суммарной дозы интенсивность умень-

шается по логарифмическому закону, и полное разрушение люминесцентных центров наступает при большой дозе — более чем $3 \cdot 10^6$ Гр. Ответственные за наведенное поглощение радиационные центры окраски, образующиеся в волокне при его γ -облучении дозой менее 10^4 Гр, полностью отжигаются при комнатной температуре за 17 ч. Доза γ -облучения волокон 10^5 Гр и более необратимо изменяет их спектр наведенного поглощения.

Авторы выражают благодарность А. Земинскому за плодотворное обсуждение работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Paul S., Goldstein J., Durst R., Fonck R. Effect of high-energy neutron flux on fiber optics in an active diagnostic on TFTR. — *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, v. 66, p. 1252.
2. Arrington K., Kefford D., Podrasky V. e.a. 1994 CERN Test Beam Results of a 0° Fiber Cherenkov Fiber Sampling Hadron Test Calorimeter: Preliminary Study for CMS Very Forward Calorimetry. CMS TN/94-327, CERN, 1994.
3. Гаврилов В.Б., Голутвин А.И., Герштейн Ю.С. и др. Спектры поглощения волоконных световодов из чистого кварца, облученных гамма-квантами от ^{60}Co . — *Приборы и техника exper.*, 1997, № 4, с. 23—32.
4. Рабин Н.В. Электрон-фотонные калориметры. Свойства материалов детекторов для калориметров (обзор). — Там же, 1992, № 6, с. 39.
5. Klose H., Krause M., Pfeiffer W. e.a. High fluence effects in scintillating plastic fibres by 16 MeV electron irradiation. — *Nucl. Instrum. Meth. B*, 1996, v. 116, p. 235—241.

Поступила в Редакцию 22.05.2000

УДК 539.128.4.164

ЖИДКОСЦИНТИЛЛЯЦИОННАЯ α -СПЕКТРОМЕТРИЯ

*Егоров В.Н., Чирин Н.А., Коломейцев Г.Ю.
(ГНЦ РФ — ВНИИМ им. А.А. Бочвара)*

α -Излучающие актиноиды обычно регистрируют методом α -спектрометрии с помощью кремниевых полупроводниковых детекторов. При этом обязательно приготовление тонкослойных препаратов на металлических подложках для измерения активности нуклидов. При одновременном определении в одной пробе изотопов нескольких химических элементов нередко приходится отделять одни элементы от других, так как условия их количественного выделения могут существенно различаться. Для разделения нуклидов химическими методами и приготовления тонкослойных препаратов электроосаждением требуется много труда и времени (около 20 ч) [1]. Поэтому сохраняется актуальность разработки более экспрессных и менее трудоемких методов одновременного определения различных актиноидов.

В работах [2—4] актиноиды определяли жидкосцинтилляционной α -спектрометрией. По сравнению с полупроводниковым этот метод имеет важные преимущества: 100%-ная эффективность регистрации α -частиц, низкий предел определения активности нуклидов и поэтому малый объем анализируемой пробы, простота и экспрессность подготовки препаратов для измерения активности нуклидов. Указанные преимущества делают метод экспрессным, менее трудоемким, высокочувствительным и абсолютным, не требующим градуировки по эффективности регистрации α -частиц. В нем, как и в радиохимическом методе полупроводниковой α -спектрометрии, необходима операция выделения радионуклидов из водных растворов проб. Однако полностью исключается трудоемкая и продолжительная процедура приготовления тонкослойных препаратов.