



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2000–33
ОЭФ

А.Б. Березина¹, Е.В. Гнучева¹, В.С. Дацко²

МАТЕРИАЛ ДЛЯ РАДИАЦИОННО СТОЙКОГО СВЕТОВОДА–СМЕСТИТЕЛЯ СПЕКТРА

Направлено в *ЖТФ, Appl. Opt.*

¹НПО “ПЛАСТИК”, Москва

²Институт физики высоких энергий (ИФВЭ), Протвино

Email: datsko@mx.ihep.su; библиотека препринтов: <http://dbserv.ihep.su/~pubs/>

Аннотация

Березина А.Б., Гнучева Е.В., Дацко В.С. Материал для радиационно стойкого световода-смещителя спектра: Препринт ИФВЭ 2000–33. – Протвино, 2000. – 9 с., 5 рис., библиогр.: 25.

Описана конструкция модуля электромагнитного калориметра. Предлагается изготавливать световод-смещитель спектра (WLS) из радиационно стойкого материала на основе полиимида.

Abstract

Berezina A.B., Gnucheva E.V., Datsko V.S. Material for Radiationhard Electromagnetic Calorimeter: ИФВЭ Preprint 2000–33. – Protvino, 2000. – p. 9, figs. 5, refs.: 25.

A construction of electromagnetic calorimeter modulus is described. It is proposed to produce a WLS from radiation hard material based on polyimide.

Введение

Распространенность и перспективы применения адронных и электромагнитных калориметров известны [1,2,3], как известны и трудности, ожидающие калориметрию в будущем. Одна из главных — радиационная стойкость калориметра в целом и составляющих его компонент в частности. Активные поиски наилучшей конструкции несомненно приведут к успеху, однако следует учесть, что к настоящему времени в мире существует большое количество калориметров, по большей части сцинтилляционных, которые неплохо себя зарекомендовали и которые после некоторой модернизации во многих случаях способны продолжить свою работу и в более трудных условиях, чем те, в которых они работают в настоящее время.

Анализ проблемы

Проанализируем особенности конструкции на примере разработанного в ИФВЭ электромагнитного калориметра (чертежи №4747-00-00-00), конструкция которого схематично изображена на рис. 1.

Калориметр аналогичен [4], состоит из чередующихся слоёв поглотителя (или иначе “радиатора”, свинец толщиной $t_n = 1.4$ мм, на рис. 1 — незакрашенные квадраты) и “активных” слоёв (сцинтиллятор на основе полистирола толщиной $t_c = 5$ мм, на рис. 1 — покрашенные квадраты). На наборе из 77 слоёв (составляет ~ 20 радиационных единиц) лежит без оптического контакта световод-смещитель спектра (ССС, на рис. 1 — покрашенная пластина), одним торцом сопряжённый с фоторегистратором (обычно с ФЭУ, тип

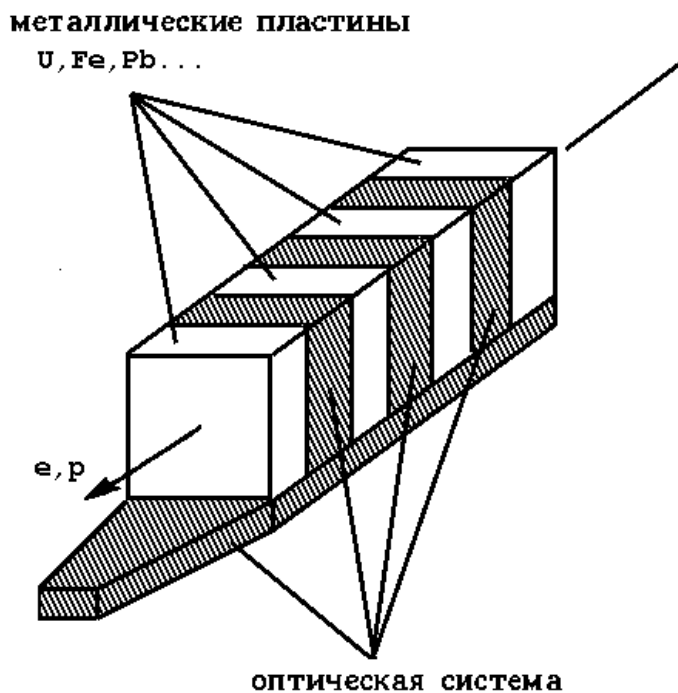


Рис. 1. Схематическое изображение калориметра.

которого определяется из условия наилучшего совмещения спектральных характеристик цепочки: сцинтиллятор – ССС – ФЭУ).

Любой такой калориметр должен обладать приемлемым энергетическим разрешением в пределах $\frac{\sigma_E}{E} \approx \frac{7\%}{\sqrt{E}} - \frac{14\%}{\sqrt{E}}$, быстродействием порядка 10 нсек, линейностью характеристик, возможностью работы в магнитных полях, радиационной стойкостью в пределах хотя бы 10 – 100 Мрад и наименьшей возможной стоимостью. Последнее требование обусловлено циклопическими размерами проектирующихся установок и соответственно большим количеством модулей, т.е. каналов регистрации.

Наиболее критичная компонента калориметра, сказывающаяся практически на всех перечисленных характеристиках прибора — ССС. Чаще всего он представляет из себя, как и в анализируемом варианте, пластину оргстекла (ПММА) с люминесцирующими добавками. С его помощью собирают 1–3% света, возникающего в сцинтилляторе, поэтому любые погрешности световода резко сказываются на параметрах прибора. Основная доля стоимости прибора приходится на фоторегистратор — ФЭУ с делителем и системой питания.

Временные характеристики калориметра обусловлены в основном свойствами ФЭУ (ФЭУ-84-3 ~15–40 нсек), поскольку время высвечивания как распространённых пластических сцинтилляторов, так и люминесцирующих добавок ССС ~ 4 нсек. Свойства ФЭУ определяют и невозможность работы в магнитных полях.

Радиационная стойкость поглотителей (обычно металла, в данном случае у нас свинец) вполне обеспечивает потребности экспериментов и не вызывает беспокойства.

Радиационная стойкость пластических сцинтилляторов, по измерениям и литературным данным [5,6,7,8], примерно на порядок превосходит стойкость материала световода, составляет ~ 1–10 Мрад и почти достигает нижней границы требующейся радиационной стойкости. Стойкость ССС, как правило, считается неудовлетворительной (если не принимать во внимание повышение эффективной радиационной стойкости в свепотах — СВЕтоводах-смесителях спектра ПОВерхностного Типа см. [9]), но в ещё большей степени вызывает опасение стойкость ФЭУ (см., однако, работу [10]), так как стёкла выдерживают на 2–3 порядка меньшие радиационные нагрузки [11].

Таким образом, по большинству параметров наиболее критичным звеном является система светосбора, включающая в себя цепочку: ССС + фоторегистратор.

Можно снизить стоимость модуля, получив при этом возможность работать в магнитных полях, за счёт перехода от ФЭУ к полупроводниковым фотоприёмникам, технология производства которых бурно прогрессирует, правда, вызывает некоторые раздумья их необходимая высокая радиационная стойкость, хотя, по утверждению технологов, и возможно получение фотодиодов, работоспособных в области ~ 1–10 Мрад. Другой путь — вынос фоторегистратора хоть ФЭУ, хоть фотодиода из радиационной зоны в зону с приемлемыми радиационными нагрузками. Однако в случае применения фотодиода необходимо решить задачу сбора света с передачей его на малую площадь. Эта задача ещё ждёт наилучшего решения, но, в принципе, можно собирать свет сцинтиллятора волоконными световодами и передавать по ним свет на требуемое расстояние, состыковав с используемым фоторегистратором. Естественно, к световолокну предъявляются определённые требования: оно также должно быть радиационно стойким, его числовая апертура (обеспечивающая высокий коэффициент перехвата) должна быть как можно больше, точно так же, как и прозрачность, характеризуемая обычно величиной l_0 . В [12,13] приведена методика измерения интересующих нас величин, одной из которых является

$$l_0 = \frac{x_2 - x_1}{\ln \frac{I_{x_1}}{I_{x_2}}},$$

длина, на которой свет, распространяющийся в материале, ослабляется в e раз.

Таким образом, задачу можно кратко сформулировать следующим образом: необходимо разработать модуль калориметра с радиационно стойким ССС, реализующим систему светосбора с удалённым фоторегистратором.

Материал для световода-смещителя спектра

Недостаточная радиационная стойкость ПММА — основного материала для световодов-смещителей спектра [14] — заставила искать какой-либо альтернативный материал.

Безусловно, следует оспорить утверждение автора очень полезного обзора [25], который утверждает: “При энергиях $2 \div 14$ ТэВ и светимостях $10^{32} \div 10^{34}$ см⁻²сек⁻¹ ...**априори ясно**, что полимеры (сцинтилляторы, световоды, изоляция и др.) не могут выдержать такие радиационные нагрузки. ...Увеличить ресурс сцинтилляторов в 10–30 раз невозможно традиционными химико-технологическими способами...” Возможности традиционных химико-технологических способов еще далеко не исчерпаны! Это верно и в отношении собственно сцинтилляторов, чему, надо надеяться, будет посвящена одна из будущих публикаций.

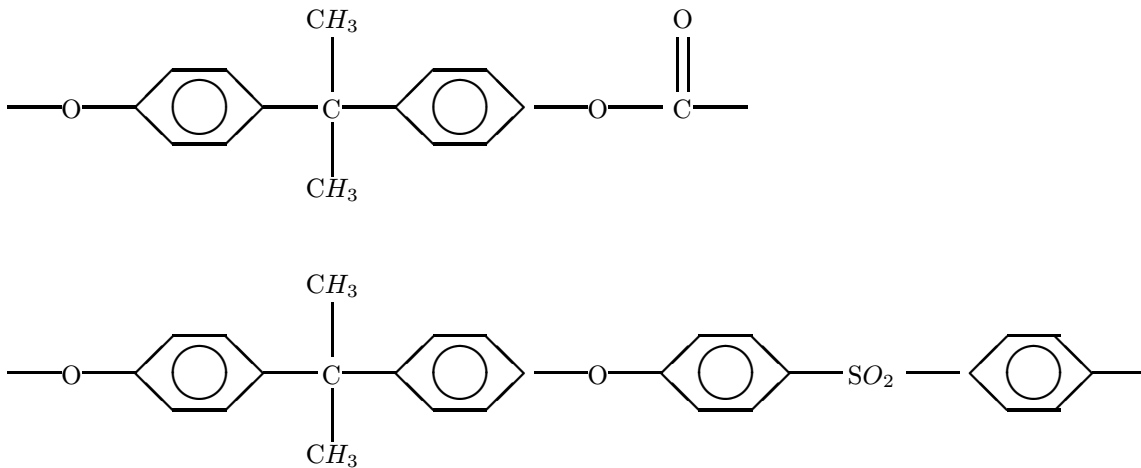


Рис. 2. Обращает на себя внимание похожесть химических формул поликарбоната — оптического полимера $C_{16}H_{14}O_3$ (вверху) и полисульфона $C_{27}H_{22}O_4S$ (внизу).

В данной работе повышение радиационной стойкости ССС связано с “...традиционным химико-технологическим способом...” — выбором в качестве матрицы для изготовления ССС нового материала. Давно обращает на себя внимание класс полиимидных материалов [15] — полимеров, обладающих высокой радиационной стойкостью ($10^3 \div 10^4$ мрад, см. также [16], где обнаружена значительная разница в реакции полиимидов на облучение нейтронами и протонами). В настоящее время существуют и другие материалы. Достаточно упомянуть, что полисульфон (см. рис. 2) используется как электроизоляционный материал внутри ядерных реакторов, и, по оценкам ([15], с. 150), дозы в $10^4 - 2 \cdot 10^4$ Мрад

никак не меняют его характеристик, правда, речь идёт о механических характеристиках, об использовании его в оптике данных нет.

Правда, в физикохимии [17] считается известным, что при радиационном повреждении в первую очередь меняются механические свойства материала, влияние на оптические свойства проявляется, как правило, при больших дозах. Это же касается и каптона ([8], с. 6). А использование полиимидов в качестве ССС (предложено одним из авторов данной работы на рабочем совещании “Радиационно стойкие органические сцинтилляционные детекторы.” ИФВЭ, Протвино, 12–13 декабря 1990 г., см. также работу [18], где предложено использовать полиимиды в интегральной оптике) способно дать большие преимущества в нескольких отношениях.

Показатель преломления ПММА $n \approx 1.5$, что даёт угол полного внутреннего отражения для световода из ПММА:

$$\sin u_{n_{\text{пмма}}} \approx \frac{1}{1.5}, \quad u_{n_{\text{пмма}}} \approx 48^\circ, \quad (1)$$

а для световода из полиимида, у которого ([15], с. 151) $n \approx 1.82$,

$$\sin u_{\text{имид}} \approx \frac{1}{1.82}, \quad u_{\text{имид}} \approx 57^\circ. \quad (2)$$

Часть света, выходящая через одну из граней и заключённая внутри конуса с углом i при вершине, в соответствии с [19,20], равна:

$$f_t = \frac{1}{4\pi} \int \int_D \sin \vartheta d\vartheta d\varphi = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^i \sin \vartheta d\vartheta = \frac{1}{4\pi} \cdot 2\pi \cdot (1 - \cos i) = \frac{(1 - \cos i)}{2}. \quad (3)$$

Поскольку $\sin i = \frac{1}{n}$, то $\cos i = \sqrt{1 - \sin^2 i} = \sqrt{1 - \frac{1}{n^2}} = \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{n}$. Тогда:

$$f_t = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{n}\right).$$

И, соответственно, в 6 конусов (см. рис. 3) выйдет

$$F_t = 6 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{n}\right) = 3 \left(1 - \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{n}\right). \quad (4)$$

Останется в образце:

$$F_a = 1 - F_t = 1 - 3 \left(1 - \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{n}\right) = 3 \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{n} - 2. \quad (5)$$

К выходному торцу пойдет не больше половины этого света. Кроме того, для тонких световодов можно пренебречь прямыми лучами и учитывать только лучи, распространяющиеся за счет полного внутреннего отражения. Это дает для $n \approx 1.5$ значение $F_{a1}/2 \approx 0.235/2$, а для $n \approx 1.82$ значение $F_{a2}/2 \approx 0.505/2$, т. е. $\frac{F_{a2}}{F_{a1}} \approx 2.15$. Это означает, что полиимидный световод или, что то же самое, полиимидное волокно без оболочки захватит примерно в два раза больше света, чем волокно из ПММА (тоже без оболочки). Но даже и для толстых световодов, при учете прямых лучей (нужно добавить к $F_{a1}/2$

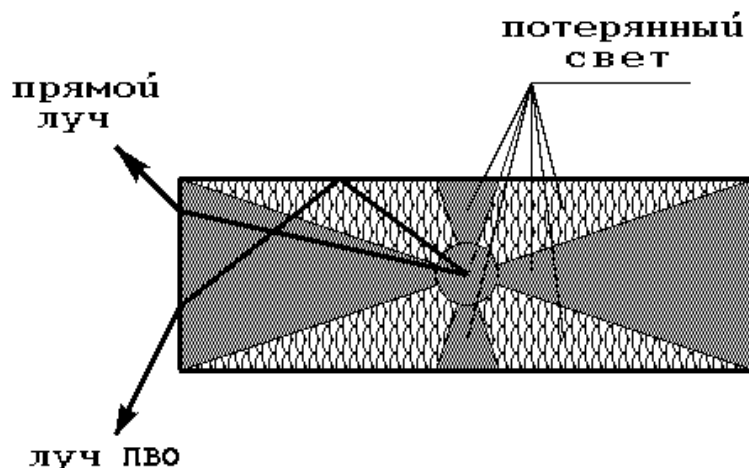


Рис. 3. К фоторегистратору идет свет, показанный стрелками. Закрашенные конусы — свет, не испытывающий полного внутреннего отражения.

один конус — $\frac{1}{2}(1 - \frac{\sqrt{n^2-1}}{n})$ получается выигрыш в ~ 1.4 раза. Это в любом случае неплохо, но особенно важно, если иметь в виду перспективу использования фотодиодов.

Следующее значительное преимущество полиимидов связано с механизмом работы ССС в калориметре. Первичная частица возбуждает в модуле калориметра каскад вторичных частиц, вызывающих сцинтилляционные вспышки в пластинках полистирольного сцинтиллятора, свет от которых, попадая на ССС, поглощается и снова излучается (переизлучается) с большей длиной волны. Часть переизлучённого света за счёт полного внутреннего отражения транспортируется к фоторегистратору. Этот механизм работы ССС обеспечивается подбором соответствующих добавок, означающим, что переизлучатель должен иметь спектр люминесценции, хорошо согласованный со спектральной чувствительностью фоторегистратора, а спектр поглощения — со спектром испускания сцинтилляторов. Амплитуда светового сигнала пропорциональна числу частиц каскада, которое пропорционально энергии частицы, вызвавшей каскад (ливень). Когда налетающая частица попадает в область модуля калориметра, примыкающую к его продольной оси, по крайней мере, точка попадания удалена от ССС, частицы развивающегося в модуле ливня практически не пересекают ССС и соответственно на фоторегистратор приходит свет лишь от сцинтилляторов (но с помощью, разумеется, световода), в этом случае зависимостью светового сигнала на фоторегистраторе от места попадания в сцинтиллятор частицы ливня можно пренебречь. В случае, когда налетающая частица проходит вблизи от ССС, частицы периферии ливня, а если ось ливня (т.е. точка попадания первичной частицы) достаточно близко расположена от ССС, то и частицы ствола ливня пересекают световод, вызывая в нём черенковское свечение, которое поглощается переизлучающей добавкой и после этого становится неотличимым от регистрируемого сцинтилляционного света. Учитывая, что лучшие на сегодняшний день ССС перехватывают $\leq 3\%$ падающего на них сцинтилляционного света, а интенсивность черенковского света примерно на два порядка меньше сцинтилляционного, но он весь находится уже внутри световода и перехватится полностью, становится ясно — амплитуда сигнала фоторегистратора возрастёт за счёт черенковского света весьма значительно (в [21] на 10%). Это приводит к тому, что становятся неотличимыми высокоэнергетическая частица, проходящая вдали от переизлучателя, и низкоэнергетическая, проходящая вблизи от него.

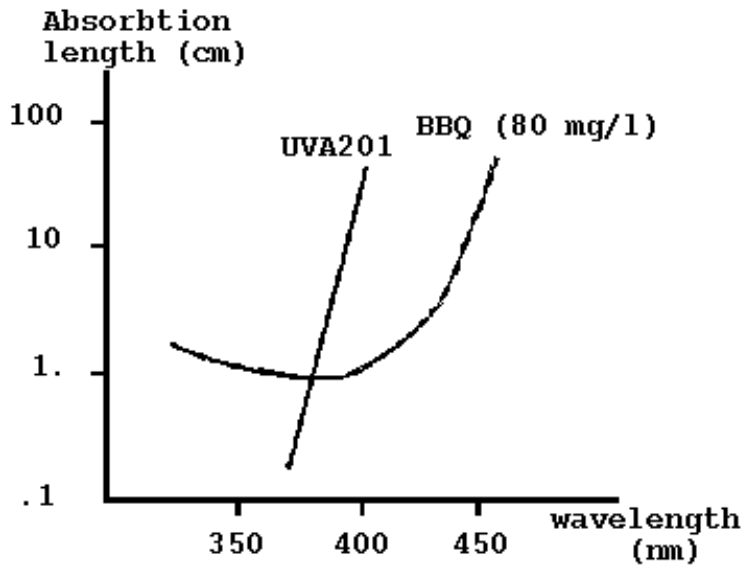


Рис. 4. Иллюстрация свойств UVA.

из-за того, что начнёт поглощаться “полезный” свет от сцинтилляторов. Полиимид окрашен примесями в светло-коричневые тона, спектры пропускания некоторых образцов приведены на рис. 5.

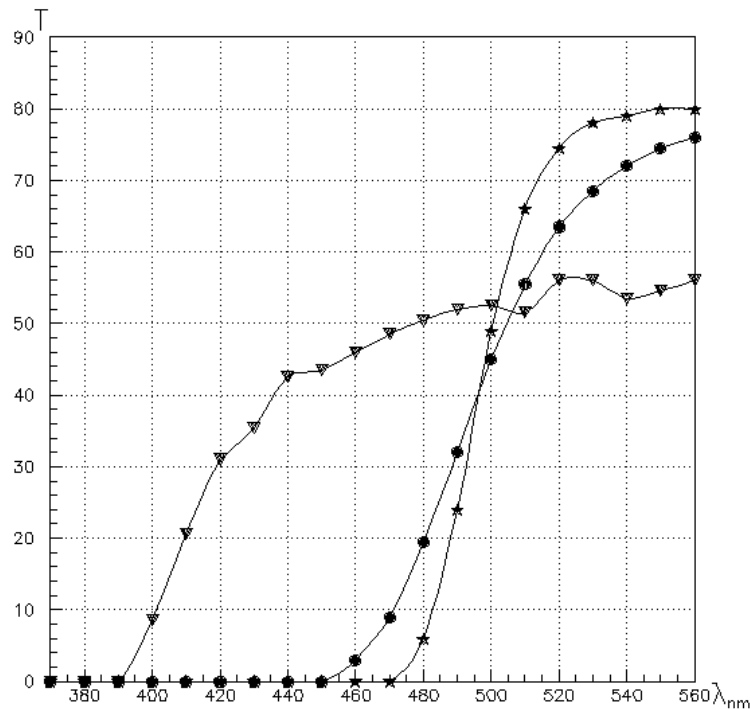


Рис. 5. Спектры пропускания: ★ — спектр пропускания люминесцирующей добавки; ●, ▽ — спектры пропускания двух различных полиимидов.

Чтобы подавить этот эффект, в работе [22] предлагается вводить в объём световода вместе с добавкой — сместителем спектра ещё и добавку — поглотитель ультрафиолета, поскольку значительная часть черенковского излучения лежит в этой спектральной области. Обрезающая граница добавки UVA — ultraviolet absorber — лежит в области всего лишь ~ 360 нм (рис. 4 взят из работы [22]). Неоптимальное положение границы объясняется и трудностью подбора соответствующей добавки, и невозможностью сдвинуть границу обрезания правее, в область больших длин волн,

В данном случае такое “загрязнение” представляет значительное преимущество по сравнению с другими материалами — сырьём для ССС, использующихся в калориметрах для элементарных частиц. Подбор добавок с заданными свойствами — непростая задача, в данном случае она, к счастью, решается именно присутствием “загрязнений”, которые и являются самыми настоящими загрязнениями и очистка сырья от которых резко удорожает материал. Рис. 5 показывает, что если для ССС выбрать переизлучающую добавку со спектром пропускания, обозначенным звёздочками (\star , спектр регистрировался в этанольном растворе), то спектр пропускания полиимида (\bullet) не только обеспечивает прохождение практически без помех света добавки, но и подавляет весь коротковолновый свет вплоть до коротковолновой границы её спектра поглощения. При этом вовсе не нужно готовить светофильтр специально, скажем, по методике [23]!

Несколько худший результат представлен для другого типа полиимидов (∇), но и для него граница обрезания лежит, по крайней мере, в области 420 нм. Рис. 5, на котором представлены спектры пропускания полиимидов и выбранного для использования люминофора, показывает ещё и то, что при данном взаиморасположении спектров материал ∇ еще можно красить введением добавки в объём (“в массу”), а материал \bullet — только по поверхности, иначе из-за перекрытия спектров падающий на ССС свет будет поглощаться материалом-матрицей раньше, чем достигнет люминесцирующего центра, по крайней мере, коэффициент перехвата света добавкой будет очень мал.

Заключение

Для применения в калориметрах, кроме экстремально стойких полиимидов, в зависимости от условий применения могут оказаться полезными и некоторые более доступные материалы. При поиске подходящих материалов в качестве кандидатов опробованы майлар (лавсан) и полистирол. Технология их переработки находится в разной степени готовности, однако первый вывод таков: и тот и другой материалы могут окрашиваться и в объёме, и по поверхности. Образцы майлара пока не обладают нужным качеством (технология недоработана).

В отношении полистирола ситуация более обнадеживающая. Поверхностно окрашенный полистирол с габаритами $500 \times 30 \times 10$ мм в зависимости от состояния материала и технологии показывает: $\eta \simeq 0.003 \div 4.0\%$ и $l_0 \simeq 28 \div 170$ см. Объёмно окрашенный полистирол (с габаритами $500 \times 20 \times 10$ мм) обладает коэффициентом перехвата $\eta \simeq 4.5\%$ и $l_0 \simeq 43$ см.

Образец именно с этими параметрами был использован для приготовления другого, с габаритами $250 \times 20 \times 0.1$ мм. Такая 100-микронная плёнка обладает $\eta \simeq 2.08\%$ и $l_0 \simeq 5$ см. Полистирол другой фирмы после идентичной обработки — $\eta \simeq 0.01\%$ и $l_0 \simeq 5$ см.

Поскольку для переработки полиимидов очень важна толщина материала и доступна пока лишь плёнка толщиной не более 100 микрон, тестовые образцы были приготовлены из плёнки толщиной 7 микрон, а полистирольные использовались для сравнения. Первые образцы свепотов, изготовленные из плёнки толщиной 7 мкм по технологии [24], имеют (лучший результат) $\eta \simeq 0.02\%$ и $l_0 \simeq 2$ см.

Ввиду своих замечательных свойств: термостойкости, механической прочности, стойкости к агрессивным средам, радиационной стойкости и др. полиимиды крайне трудно модифицируются, это означает, что на пути создания световодов-смещителей спектра на

базе полиимидов стоят значительные технологические трудности. Однако эти трудности преодолимы.

Чтобы убедиться в этом, были изготовлены образцы окрашенного в массу оргстекла со спектром поглощения, совпадающим с полиимидным, близким приведённому на рис. 5 (или стеклянному светофильтру ЖС-16). Исследованные образцы оргстекла $l \approx 1.5$ м толщиной $d = 3$ мм показывают принципиальную возможность регистрации света приемлемой интенсивности в светло-коричневом световоде с расстояния, по крайней мере, ≤ 1.5 м.

Сравнение результатов, с одной стороны, для полистирольной пленки толщиной $d=100$ мкм и образцов с $d = 1 \div 10$ мм, и, с другой, для радиационно стойкой среды с $d=7$ мкм позволяет ожидать получение свепота с $l_0 \sim 2$ м.

Список литературы

- [1] Прокошкин Ю.Д. Годоскопические калориметры как базовые детекторы для измерения координат и энергий частиц в экспериментах в 10-ТэВ области. Препринт ИФВЭ 79-148, Серпухов, 1979.
- [2] Wigmans R. High rezolution hadron calorimetry. Amsterdam, NIKHEF-H/87-8, 1987.
- [3] Fabian C.W. Calorimetry in High-Energy Physics. GENEVA, CERN-EP/85-54, 1985.
- [4] Hoffmann W. et al. Characteristics of Lead-Scintillator Sampling Shower Counters for the Detection of Electrons and Photons in the Energy Range 70 MeV to 6 GeV. Hamburg, DESY-81-045, 1981.
- [5] Kircher J.B., Bouman R.E. Effect of Radiation on Materials and Components., N.Y., 1972.
- [6] Гундер О.А. Исследование радиационной стойкости пластмассовых сцинтилляторов. Препринт ИМК-91-15, Харьков, 1991.
- [7] Медведев М.Н. Сцинтилляционные детекторы. — М.: Атомиздат, 1977.
- [8] Ажгирей И.Л., Мохов Н.В. Радиационные нагрузки на элементы установки для экспериментов на 0.4×3 -ТэВ коллайдере УНК. Препринт ИФВЭ 90-132, Протвино, 1990.
- [9] Дацко В.С. К методике тестирования радиационной стойкости конструктивных элементов калориметров. // ПТЭ, 1996, № 3, с. 43.
- [10] Белянченко С.А., Бритвич Г.И., Глуховский Б.М., Дацко В.С., Кобаяши М., Рыкалин В.И., Смолицкий В.А. Изучение радиационной стойкости фотоумножителей. Препринт ИФВЭ 96-90, Протвино, 1996.
- [11] Инякин А.В., Какауридзе Д.Б., Леднёв А.А. Исследование характеристик радиаторов γ -спектрометров из свинцового стекла, облучённых частицами высоких энергий. Препринт ИФВЭ 82-6, Серпухов, 1982.
- [12] ГОСТ 17038.0-79 - ГОСТ 17038.7-79. Детекторы ионизирующих излучений сцинтилляционные. Методы измерений сцинтилляционных параметров. — М., 1979.
- [13] Дацко В.С., Дацко Н.А. Определение параметров люминесцирующих оптических материалов. Препринт ИФВЭ 95-131, Протвино, 1995.
- [14] Machova L., Kalinova N., Dvoranek L. Polimery Pro Swetlovody. Polimery-Chemie, Vlastnosti a Zpracovani S15. Sbornik, 1986, pp. 33-45.

- [15] Полиимиды — класс термостойких полимеров./Отв. ред. М.И. Бессонов. — Л.: Наука (Л. о.), 1983.
- [16] Rai V.N. Optical properties of neutron and proton irradiated Kapton foil.// Applied Optics, 1989, v. 28, № 13, pp. 2450-2451.
- [17] Милинчук В.К. и др. Макрорадикалы. — М.: Химия, 1980.
- [18] Reuter R., Franke H., Feger C. Evaluating polyimides as lightguide materials.// Applied Optics, 1988, v. 27, № 21, pp. 4565-4571.
- [19] Цирлин Ю.А. Светособирание в сцинтилляционных счётчиках. — М.: Атомиздат, 1975.
- [20] Keil G. Design Principles of Fluorescence Radiation Converters.//NIM, 1970, v. 87, pp. 111-123.
- [21] Fessler H. et al. A Scintillator-Lead Photon Calorimeter Using Optical Fiber Readout Systems. MPI - PAE / Exp.E1. 149, Munich, 1985.
- [22] Botner O. et al. A Hadron Calorimeter with Wavelength Shifter Read-Out. Geneva, CERN-EP/80-126, 1980.
- [23] Latham W.J., Hawly D.W. Color Filters from Deyed Polyimides.//Solid State Technology, 1988, v. 31, № 5, pp. 223-228.
- [24] Дацко В.С. Способ изготовления пластмассовых световодов-смесителей спектра и сцинтилляторов. А.С. № 1660493, 1990; БИ, 4, 1994, с. 188.
- [25] Зайцев Л. Н. Проблема увеличения радиационного ресурса сцинтилляционных детекторов для протонных и ионных коллайдеров.//ФЭЧАЯ, 1999, т. 30, вып. 5, с. 1292-1327.

Рукопись поступила 17 июля 2000 г.

А.Б. Березина, Е.В. Гнучева , В.С. Дацко
Материал для радиационно стойкого световода–смещителя спектра.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .
Редактор Л.Ф.Васильева. Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 20.07.2000 г. Формат $60 \times 84/8$. Офсетная печать.
Печ.л. 1,12. Уч.-изд.л. 0,9. Тираж 130. Заказ 172. Индекс 3649.
ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

