



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 98–14
ОНФ

В.А.Бумажнов, В.И.Кочетков, В.А.Маяцкий¹, В.А.Онучин,
В.К.Семенов, А.П.Солдатов

КОМПОЗИЦИОННЫЕ СЦИНТИЛЛЯТОРЫ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ КАЛОРИМЕТРИИ

Направлено в *ПТЭ*

¹ ТОО “Унипласт”, г. Владимир

Протвино 1998

Аннотация

Бумажнов В.А. и др. Композиционные сцинтилляторы для прецизионной калориметрии: Препринт ИФВЭ 98–14. – Протвино, 1998. – 11 с., 4 рис., 2 табл., библиогр.: 27.

Измерены характеристики композиционных сцинтилляторов на основе полистирола с наполнителями из CeF_3 , BaF_2 , PbF_2 . Сцинтилляторы были изготовлены в виде перфорированных пластин методом литья под давлением, используемых в электромагнитных калориметрах типа “шашлык”, в которых светосбор осуществляется с помощью спектросмещающих волокон. Для сравнения приведены результаты измерения световыхода сцинтилляторов без наполнителя с толщинами от 0,5 до 4 мм, которые используются в калориметрах типа “шашлык” с тонкой сэмпинговой структурой. Методом Монте-Карло проведен расчет предельного энергетического разрешения калориметров с использованием сцинтилляторов с различными толщинами, с утяжеляющими добавками и без них. Проведенный анализ и экспериментально полученные результаты указывают на реальную перспективу создания калориметров с разрешением лучше $\frac{5\%}{\sqrt{E}}$ на основе полученных сцинтилляторов. Рассмотрены методы повышения эффективности светосбора и световыхода композиционных сцинтилляторов.

Abstract

Bumazhnov V.A. et al. Composite Scintillators for Presice Calorimetry: IHEP Preprint 98–14. – Protvino, 1998. – p. 11, figs. 4, tables 2, refs.: 27.

The main parameters of composite scintillators based on polystyrene filled with CeF_3 , BaF_2 , PbF_2 have been studied. Monte-Carlo study of energy resolution of electromagnetic calorimeter made of heavy composite scintillator has been performed. The results of analysis show possibility of development of electromagnetic calorimeter with energy resolution better than $\frac{5\%}{\sqrt{E}}$ made of composite scintillators. The different methods have been considered to improve light yield and transparency of such type of scintillators.

Основной целью проведения данной работы являлось исследование возможности применения композиционных сцинтилляционных материалов в качестве активной детектирующей среды прецизионных электромагнитных калориметров.

Технология композиционных материалов — одно из наиболее быстро развивающихся направлений в промышленности [1]. Однако до настоящего времени применение сцинтилляционных композиционных материалов ограничивалось в основном дозиметрией и детекторами нейтронов [2], [3]. Основным препятствием в использовании подобных сцинтилляторов является их низкая прозрачность, обусловленная рассеянием света на частицах наполнителя. В ряде случаев можно значительно снизить требования к прозрачности сцинтилляторов. Это справедливо, например, для калориметра типа “шашлык” [4],[5], в котором светосбор осуществляется с помощью спектросмещающих волокон, равномерно пронизывающих весь объем детектора.

Наполняя пластический сцинтиллятор утяжеляющей добавкой и тем самым уменьшая радиационную длину сцинтиллятора, достигается большая “гомогенность” сэмплинг-калориметра. Это приводит к уменьшению сэмплинг-флуктуаций, которые определяют предельное энергетическое разрешение гетерогенного калориметра.

1. Вещества наполнители

В качестве наполнителей были выбраны фториды тяжелых металлов по следующим причинам:

- все они имеют довольно короткую радиационную длину (см. табл.1);
- близость их показателей преломления к пластикам (см. рис.3, табл.1);
- оптическая прозрачность в диапазоне излучения люминисцирующих добавок (см. рис. 4, табл.1);
- фториды бария и церия сами являются сцинтилляторами [6],[7], а фторид свинца используется в качестве черенковского радиатора в гомогенных электромагнитных калориметрах [8], [9].

Таблица 1. Характеристики веществ наполнителей

	CeF ₃	BaF ₂	PbF ₂
Плотность (г/см ³)	6.16	4.88	7.76
Радиационная длина (см)	1.68	2.05	0.93
Показатель преломления, n_D	1.62	1.49	1.75
Максимум спектра излучения (нм)	340	210(320)	—
Световыход (в % от NaI (Tl))	5	5(16)	—
Время высвечивания (нс)	27	0.9(630)	—

Исходные вещества наполнителей представляли собой мелкодисперсные порошки с размером частиц не более 100 мкм.

Была проведена проверка сцинтилляционных свойств веществ наполнителей. Для этого использовался ФЭУ с кварцевым окном — ХР-2020Q. Порошки насыпались прямо на фотокатод ФЭУ. При облучении гамма-квантами от ^{137}Cs наблюдались сцинтилляции CeF₃ и BaF₂. Времена высвечивания CeF₃ и BaF₂, а также отношение “световыход медленной компоненты излучения — световыход быстрой компоненты излучения” для BaF₂, оказались в хорошем согласии с табличными данными (см. табл.1).

2. Изготовление опытных образцов

На предприятии ТОО “Унипласт” (г.Владимир) были изготовлены опытные образцы композиционных сцинтилляторов на основе полистирола со вторичными люминесцирующими добавками (1,5% — РТР, 0,01% — РОРОР) с различными концентрациями наполнителей. Сцинтилляторы производились методом литья под давлением в той же самой пресс-форме, что и сцинтилляторы [10] для электромагнитного калориметра типа “шашлык” [4] установки ФЕНИКС [5]. Пластины имели 36 отверстий ($\phi = 1,5$ мм) для спектросмещающих волокон, размеры составляли 55×55×4 мм.

Введение в сцинтиллятор наполнителей приводит к значительному возрастанию вязкости расплава смеси, что затрудняет его течение при инжекционном литье [11]. Это ограничивает предельную величину концентрации наполнителя, которая в нашем случае составила 30% (весовых). Дальнейшее повышение концентрации наполнителя требует модернизации конструкции существующей пресс-формы и коррекции технологии процесса изготовления.

3. Измерение световыхода сцинтилляторов

Для определения относительного световыхода композиционных сцинтилляторов с учетом эффективности светосбора использовался отклик пластин сцинтиллятора на ионизацию, производимую космическими мюонами.

Сборка из 5 пластин, проложенных слоями белая-черная-белая бумага, обрачивалась отражающей бумагой TYVEK. Светосбор осуществлялся с помощью

спектросмещающих волокон (BCF-99-29A [12], $\phi=1$ мм), имитируя реальную конфигурацию системы светосбора, используемой в калориметре типа “шашлык”. Световой сигнал регистрировался ФЭУ-143 с последующей оцифровкой и обработкой данных на компьютере. Скорость набора статистики составляла приблизительно 150 событий в час. Для замены исследуемых пластин сборка производилась заново. В начале и в конце серии измерений перемерялся световыход реперных пластин, с целью контроля повторяемости, которая составила 8–10%.

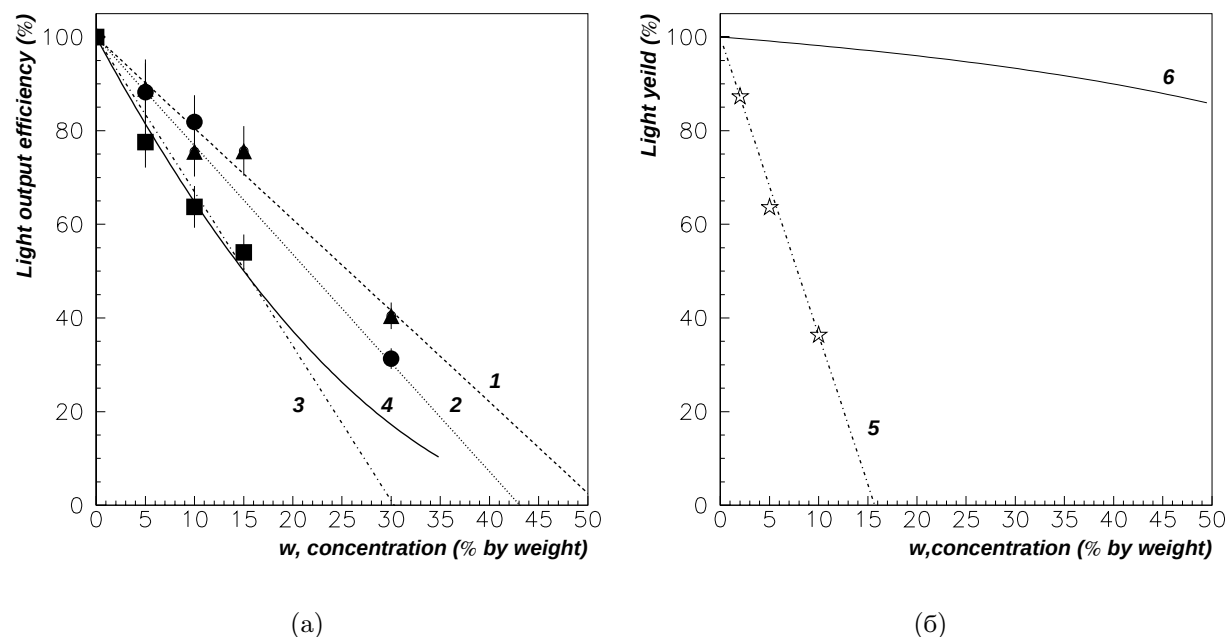


Рис. 1. Результаты измерений зависимости величины относительного светосбора (а) и световыхода (б) от концентрации наполнения композиционных сцинтилляторов: 1 — CeF₃; 2 — BaF₂; 3 — PbF₂. Линии 1-3 — линейные аппроксимации экспериментальных данных. Кривые: 4 — модельное описание экспериментальных данных для PbF₂ (см. текст); 5 — сцинтиллятор на основе органического соединения свинца BC452 [12]; 6 — изменение световыхода за счет вытеснения материала матрицы наполнителем.

Результаты измерений свидетельствуют об уменьшении величины сцинтилляционного сигнала при увеличении концентрации наполнения (рис. 1). Основная причина такого поведения — уменьшение эффективности светосбора, так как измерения абсолютного световыхода композиционных сцинтилляторов показали, что его величина меняется незначительно (менее 20% вплоть до 30% концентрации наполнения) и практически только за счет “вытеснения” добавкой материала сцинтилляционной матрицы. Следует отметить, что при изготовлении металлонаполненных сцинтилляторов с растворенными металлоорганическими соединениями в процессе полимеризации образуются молекулярные связи между полимерной матрицей и наполнителем. Это приводит к тушению флуоресценции люминесцирующих добавок

и обуславливает значительное снижение абсолютного световыхода сцинтилляторов (см. рис. 16) на основе металлоорганических соединений при значительно меньших концентрациях утяжеляющих добавок [12], [13].

Уменьшение эффективности светосбора в композиционных сцинтилляторах происходит из-за возникновения сильного диффузионного рассеяния, которое проявляется в помутнении сцинтилляторов при их наполнении и является следствием неравенства показателей преломления материала матрицы и наполнителя.

В диффузионном приближении [2] эффективность светосбора $\varepsilon \sim \rho D^2$, где ρ — число волокон на единицу площади, D — средний диаметр светового пятна возбуждаемого точечным источником. Для несцинтиллирующего наполнителя PbF_2 диаметр (D) линейно уменьшается с увеличением концентрации наполнения, откуда следует $\varepsilon \sim \rho \cdot (1 - k \cdot w)^2$ (см. рис. 1а, кривая 4), где k — параметр, зависящий от рассеивающих свойств наполнителя, w — удельная весовая доля наполнителя. В этом случае для возбуждения света в сцинтилляторе использовался азотный лазер ($\lambda_{\text{изл}} = 337$ нм).

Образцы с наполнителем BaF_2 по степени помутнения сравнимы с композиционным сцинтиллятором на основе PbF_2 , но величина светосбора в них заметно выше, что частично можно отнести за счет конверсии сцинтилляций BaF_2 в люминесцирующих добавках, растворенных в полистироле (см. рис. 4). Световыход сцинтиллятора с CeF_3 превышает остальные за счет значительно меньшего помутнения, что является следствием близости его показателя преломления к показателю преломления полистирола (см. рис. 3б).

Для улучшения энергетического разрешения калориметра, помимо введения наполнителя в пластик, необходимо уменьшать толщины слоев свинец-сцинтиллятор. Опыт показывает, что технически возможно изготовить модуль калориметра с толщиной свинца 0,25 мм, сцинтиллятора — 0,5 мм. Для ответа на вопрос не повлечет ли уменьшение толщины сцинтиллятора значительное изменение эффективности светосбора, были изготовлены опытные образцы ненаполненного сцинтиллятора толщиной 0,5; 1; 2; 3; 4 мм. Измерения их световыхода проводились с помощью радиоактивных источников.

Светосбор осуществлялся с помощью спектросмещающих волокон BCF-99-29А. Пластина сцинтиллятора была завернута в диффузионно отражающую бумагу TYVEK. Измерения проводились токовым методом с повторяемостью результатов 3–4%.

Результаты измерений показали, что удельный световыход (световыход/толщина) уменьшается не более чем на 10% при изменении толщины сцинтиллятора от 4 до 0,5 мм.

4. Оценки энергетического разрешения

Предельное энергетическое разрешение гетерогенного калориметра определяется сэмплинг-флуктуациями. Моделирование с помощью пакета GEANT [14] показало,

что зависимость величины сэмплинг-флуктуаций (по аналогии с [15]) описывается следующей функцией:

$$\left(\frac{\sigma_E}{E}\right)_{sampling} \approx \frac{4.3}{\sqrt{E}} \times \left(\frac{t}{X_t}\right)^{0.53} \left(\frac{s}{X_s}\right)^{-0.27}, \quad (1)$$

где s и X_s — соответственно толщина пластины и радиационная длина активного вещества (наполненного сцинтиллятора), а t и X_t — соответственно толщина пластины и радиационная длина пассивного вещества (свинца).

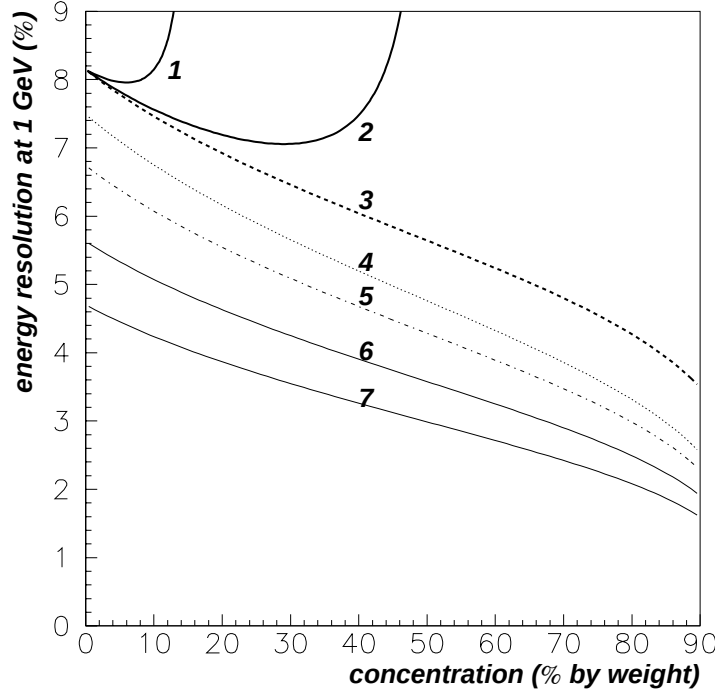


Рис. 2. Зависимость энергетического разрешения электромагнитного калориметра от концентрации наполнения при энергии 1 ГэВ: 1 — сцинтиллятор BC452, световойход меняется согласно зависимости 5 на рис. 1; 2 — сцинтиллятор, наполненный CeF_3 , световойход меняется согласно зависимости 1 на рис. 1; 3 — сцинтиллятор наполненный CeF_3 , световойход предполагается постоянный. Для кривых 1-3: $t=1,5$ мм, $N_0=1600$ ф.э./ГэВ, $\sigma_{WLS}=2\%$ (см. текст). Зависимость сэмплинг-флуктуаций калориметра от концентрации наполнения CeF_3 : 4 — $t=1,5$ мм; 5 — $t=1,0$ мм; 6 — $t=0,5$ мм; 7 — $t=0,25$ мм.

На основе полученного приближения был произведен расчет зависимости величины сэмплинг-флуктуаций от концентрации наполнения для различных толщин слоя свинца (см. рис. 2, кривые 4-7). Толщина пластины сцинтиллятора при этом выбиралась такой, чтобы эффективная радиационная длина (X_{eff}) сборки свинец-сцинтиллятор оставалась постоянной и равнялась 2 см при полной толщине калориметра $18X_{eff}$ (как в [4]). Например, при $w=0$ и $t=1,5$; 1; 0,5; 0,25 мм

соответствующие толщины сцинтилляторов $s = 4; 2,64; 1,32; 0,66$ мм при полном числе слоев свинец-сцинтиллятор равно соответственно 66; 90; 180 и 260. Увеличение концентрации наполнения приводит также к увеличению удельной доли сцинтиллятора в калориметре. Например, у гипотетического сцинтиллятора с более чем 85%-ым объемным наполнением CeF_3 радиационная длина становится менее 2 см, и необходимость в использовании свинца как пассивного конвертора отпадает. Следует отметить, что характерные величины максимальной концентрации наполнения составляют 50-60% объемных [3], [1].

Зависимость величины сэмплинг-флуктуаций для других веществ (BaF_2 , PbF_2) аналогична той, что была получена для CeF_3 , поскольку радиационная длина композиционного сцинтиллятора X_s , выраженная через удельную весовую долю (при w меньше 0,9), слабо зависит от типа наполнителя:

$$X_s(w) \approx X_s(0) \times \frac{1 - 0,82w}{1 + 3,5w}. \quad (2)$$

Величина эффективной радиационной длины сборки свинец-сцинтиллятор определяет основные геометрические размеры модуля калориметра, а также величину вклада в энергетическое разрешение продольных флуктуаций ливня ($\sigma_{WLS} \sim \frac{X_{eff}}{\lambda_{WLS}}$, где X_{eff} — эффективная радиационная длина; λ_{WLS} — длина затухания света в спектросмещающем волокне [16]), которая составляет менее 2% при использовании тех же спектросмещающих волокон, что и в электромагнитном калориметре установки ФЕНИКС.

Другой вклад в энергетическое разрешение дает фотостатистика. Для электромагнитного калориметра эксперимента ФЕНИКС он составляет в среднем $\frac{2,5\%}{\sqrt{E}}$, что соответствует световыходу $N_0 = 1600$ фотоэлектронов/ГэВ. Итоговая оценка энергетического разрешения калориметра с учетом всех вкладов, а также с учетом изменения относительного световыхода представлена на рис. 2 (кривые 1-3).

На основании данных измерений и моделирования можно сделать следующие выводы.

- Введение наполнителя в сцинтиллятор гетерогенного электромагнитного калориметра должно приводить к уменьшению сэмплинг-флуктуаций. Эффект от введения 20–30% CeF_3 в сцинтиллятор примерно такой же, как и за счет уменьшения толщин слоев свинец-сцинтиллятор в 2 раза. Это позволит уменьшить их полное число и снизить уровень сэмплинг-флуктуаций до 2–3%.
- Как следует из проведенных оценок реальнодостижимого энергетического разрешения сэмплинг-калориметра на основе полученных композиционных сцинтилляторов, падение в них эффективности светосбора практически не позволит реализовать дополнительное его улучшение (за счет уменьшения вклада сэмплинг-флуктуаций) по сравнению с ненаполненными сцинтилляторами. Это утверждение (в силу своего оценочного характера), возможно, потребует подтверждения дополнительными измерениями характеристик соответствующих прототипов на пучках частиц. Однако видно, что для достижения

энергетического разрешения лучше $\frac{5\%}{\sqrt{E}}$ необходимо искать способы повышения эффективности светосбора и абсолютного световыхода композиционных сцинтилляторов.

- Композиционные сцинтилляторы с полученными на сегодняшний день неоптимальными характеристиками уже превосходят сцинтилляторы на основе металлоорганических соединений по световыходу при заданной концентрации и максимально достигнутой концентрации утяжеляющих добавок.

5. Методы повышения световыхода сцинтилляторов

Ниже рассмотрены несколько способов повышения эффективности светосбора и световыхода композиционных сцинтилляторов.

Проведенные измерения на космических мюонах показали, что эффективность светосбора зависит практически линейно от числа спектросмещающих волокон, приходящихся на единицу площади. Основным ограничением для увеличения числа волокон является рост постоянного члена в энергетическом разрешении, обусловленный утечками электромагнитного ливня через отверстия в пластинах конверторов. В исследуемых сцинтилляторах отверстия для волокон занимают менее 2,5% от общей площади пластины. Можно в 2-3 раза повысить эффективность светосбора за счет увеличения числа волокон, имея при этом вклад в энергетическое разрешение из-за утечек ливня менее 2%, как следует из оценок с учетом данных [17].

Измерения с радиоактивными источниками показали, что использование фибров Y-11 [18] ($\phi=1.2$ мм) с двойной оболочкой вместо BCF-99-29A ($\phi=1$ мм) дает выигрыш в эффективности светосбора в 1,7–1,8 раза.

Эффективность светосбора можно также повысить за счет увеличения прозрачности композиционного сцинтиллятора. Для достижения более высокой прозрачности необходимо как можно более точное согласование коэффициентов преломления полимерной матрицы и наполнителя на длине волны излучения, т.е. необходимо создавать материалы с заданными значениями показателя преломления. Для этого можно использовать сополимеры, показатели преломления которых занимают промежуточное положение между значениями для гомополимеров. Показатель преломления сополимера линейно зависит от состава, если состав выражен в молярных долях компонентов [19]. Это правило не является строгим, поэтому для точной подгонки коэффициента преломления необходим экспериментальный подбор состава.

Например, для согласования коэффициентов преломления пластик- CeF_3 можно использовать сополимеры стирола [20] (см. рис.3, а также табл.2). Следует отметить, что согласно данным [21] световыход сцинтилляторов-сополимеров с винилнафталином и N-винилкарбазолом даже выше, чем у полистирольных сцинтилляторов.

Таблица 2. Сополимеры с показателями преломления близкими к CeF_3 ($n_D=1,62$).

	Полистирол (ПС)	N-Винилкарбазол (ВК)	Винилнафталин (ВН)	Метилметакрилат (ММА)
n_D	1.59 (рис.3)	1.683 [24]	1.6813 [24]	1.49 (рис. 3)
Сополимер	Ориентировочное содержание звеньев в сополимере (% мол.)			
ПС-ВК	65	35	—	—
ПС-ВН	65	—	35	—
ММА-ВК	—	70	—	30

Согласование коэффициентов преломления пластик- BaF_2 достигается при использовании полиуретанакрилата или сополимера фторакрилата и метилметакрилата в соотношении объемов примерно 35:65 (см. рис. 3).

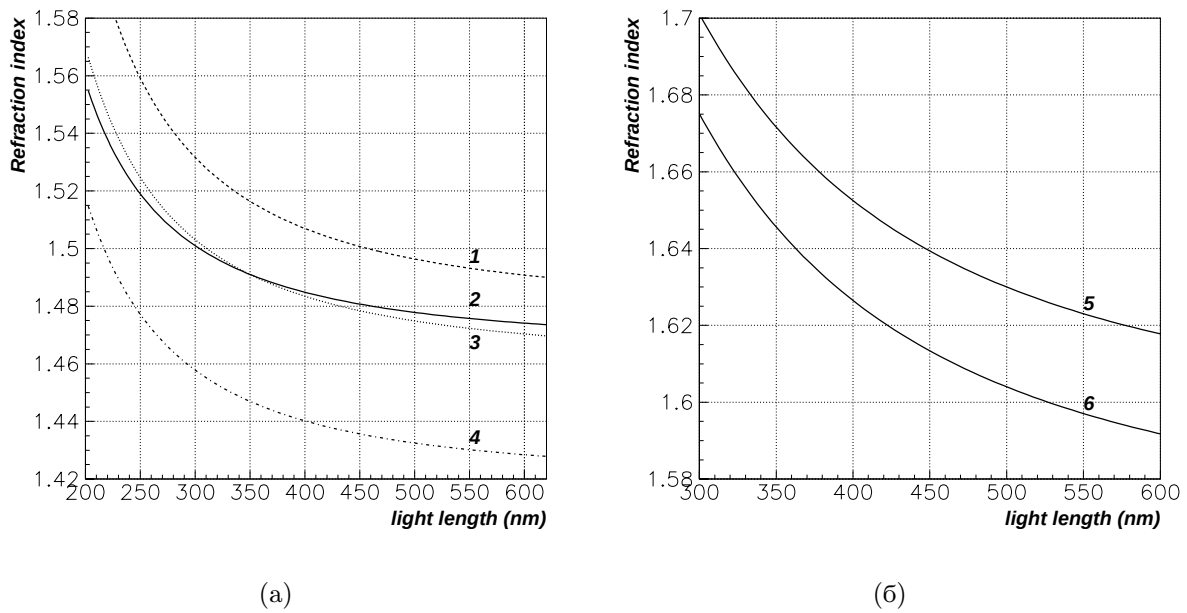
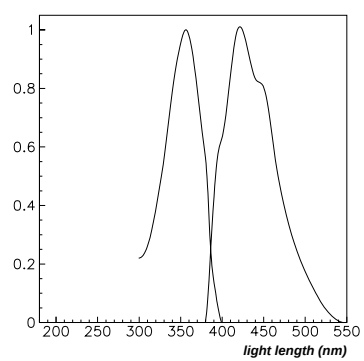
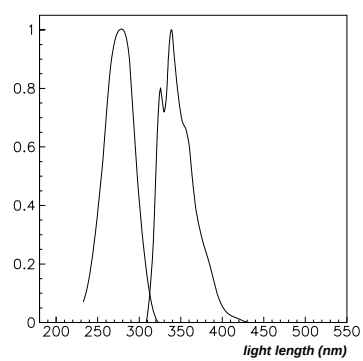


Рис. 3. Зависимость показателя преломления от длины волны излучения для следующих материалов: 1 — ПММА [23]; 2 — BaF_2 [22]; 3 — полиуретанакрилат [23]; 4 — фторакрилат [23]; 5 — CeF_3 ; 6 — полистирол [26].

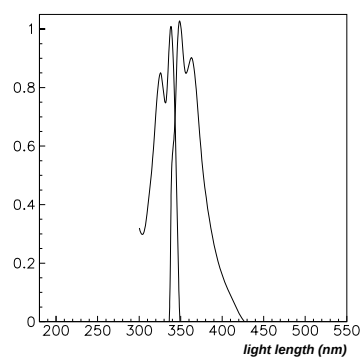
Еще один способ состоит в оптимальном подборе люминесцирующих добавок или в повышении эффективности их использования. Так, спектр излучения CeF_3 довольно хорошо перекрывает спектры поглощения РОРОР и N-винилкарбазола (см. рис. 4). В случае радиационного переноса энергии от наполнителя к люминесцирующим добавкам следует ожидать роста эффективности передачи излучения, а значит, и увеличения световыходов композиционного сцинтиллятора. Перспективными в этом отношении могут быть люминесцирующие добавки с большим стоксовым сдвигом [27].



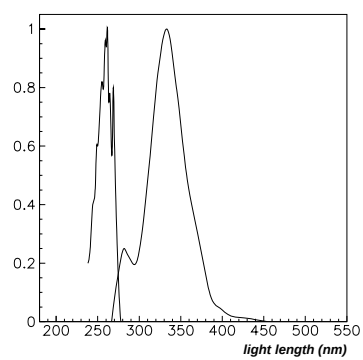
(а) POPOP [25]



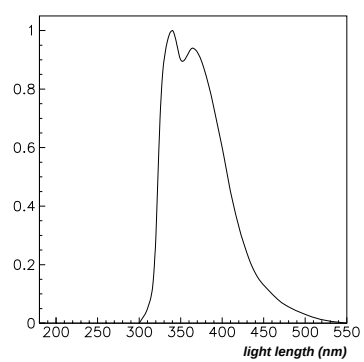
(б) PTP [25]



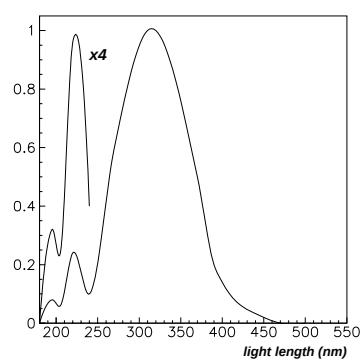
(в) N-винилкарбазол [25]



(г) полистирол [25]



(д) CeF_3 [6]



(е) BaF_2 [7]

Рис. 4. Спектры поглощения и высвечивания некоторых люминесцирующих добавок, наполнителей и полимерных матриц.

В заключение авторы считают своим долгом выразить благодарность сотрудникам ИФВЭ Г.И.Бритвичу, В.Г.Васильченко, В.Г.Лапшину, В.И.Рыкалину, а также сотрудникам БНЛ(США), Э.П.Кистеневу, G.David, S.White, C.Woody за плодотворные обсуждения.

Список литературы

- [1] Берлин А.А., Вольфсон С.А., Ошмян В.Г., Некиполов Н.С. – В кн.: Принципы создания полимерных композиционных материалов – М.: Химия, 1990.
- [2] Цирлин Ю.А. Светособирание в сцинтилляционных счетчиках. – М.: Атомиздат, 1975. См. главу “Объемно-диффузионные сцинтилляторы” и ссылки к ней.
- [3] Kubota S., Motobashi T., Ruan J. et.al. // Nuclear Instruments and Methods. 1988, v. A270, pp. 598-601.
- [4] David G., Kistenev E., Patwa A. et.al. – IEEE Transactions on Nuclear Science. 1996, vol.43, №3, pp. 1491-1496.
- [5] PHENIX Conceptual Design Report, BNL, USA, 1993.
- [6] Moses W.W., Derenzo S.E. – IEEE Transactions on Nuclear Science. 1989, vol.36, №1, pp.173-177.
- [7] Schotanus P., Dorenbos P., C.W.E. van Eijik, Lamfers H.J. – IEEE Transactions on Nuclear Science. 1989, vol. 36, №1, pp. 173-177.
- [8] Woody C.L., Kierstead J.A., Levy P.W. et al. – IEEE transactions on Nuclear Science. 1993, NS-40, p. 543.
- [9] Anderson D.F., Kierstead J.A., Paul Lecoq et al. // Nuclear Instruments and Methods. 1994, v. A342, pp. 473-476.
- [10] Беликов С.В., Вайт С., Гутников Ю.Е. и др. // ПТЭ. 1996, № 4, с. 33-41.
- [11] Кадыков М.Г., Семенов В.К., Суздалев В.И. // ПТЭ. 1991, № 1, с. 85-87.
- [12] Каталог фирмы “Bicron Corporation”, США, 1997.
- [13] Андреешев Е.А., Викторова В.С., Килин С.Ф. и др. // Оптика и спектроскопия. 1987, том 57, вып. 6, с. 1022.
- [14] GEANT 3.2.1. CERN Program Library Long Writeup W5013.
- [15] Peso J. del, Ross E. DESY 88-094, 1988.

- [16] Барков Б.П., Катинов Ю.В., Лисин В.И. и др. — Препринт ИФВЭ 92-174. Протвино, 1992.
- [17] Acosta D., Buontempo S., Caloba L. et al. // Nuclear Instruments and Methods. 1991, v. A308, pp. 481-508.
- [18] Kuraray International Corporation. New-York, NY 10166, USA.
- [19] Иоффе Б.Ф.. Руководство по рефрактометрии для химиков. — Ленинград: Изд-во Ленинградского университета, 1956.
- [20] Рупышев В.Г., Иванко Т.П., Козлова Г.И. и др. // Пластмассы, 1983, № 1, с. 58.
- [21] Барашков Н.Н., Гундер О.Е. Флуорисцирующие полимеры. — М.: Химия, 1987. См. гл. “Материалы для регистрации ионизирующих излучений”.
- [22] Malitson I.H. // J.Opt.Soc.Am. 1964, v. 54, № 5, pp. 628-632.
- [23] Гейдур С.А., Карапетян О.О., Морозов А.Г., Сидякова В.П. // Оптико-механическая промышленность, 1989, № 11, с. 30-33.
- [24] Липатов Ю.С., Нестеров А.Е., Грищенко Т.М., Веселовский Р.А. — В кн.: Справочник по химии полимеров. — Киев: Наукова думка, 1971.
- [25] Berlman I.B. Handbook of fluorescence spectra of aromatic molecules. — Academic Press, New-York, 1971.
- [26] AIP Handbook. McGraw Hill, 1972, pp. 6-109.
- [27] D'Ambrozio C., Lentz H., Tailhardat S. et al. // Nuclear Instruments and Methods. 1991, v. A308, pp. 481-508.

Рукопись поступила 24 февраля 1998 г.

В.А. Бумажнов и др.
Композиционные сцинтилляторы для прецизионной калориметрии.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы $\text{\LaTeX}$.
Редактор Н.В.Ежела. Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати	26.02.98.	Формат $60 \times 84/8$.	Офсетная печать.
Печ.л. 1,37.	Уч.-изд.л. 1,05.	Тираж 150.	Заказ 129. Индекс 3649.
ЛР №020498 17.04.97.			

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

