

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ

УДК 532.6:533.1/7:536-3:53.08:544.2: 54-14/-16: 548.3/5:54.03

МОНОКРИСТАЛЛ ТРАНС-СТИЛЬБЕНА, ВЫРАЩЕННЫЙ ИЗ РАСТВОРА И ЕГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

© 2023 г. М. С. Лясникова^{1,*}, А. А. Кулишов¹, Г. А. Юрасик¹, В. А. Постников^{1,**},
А. И. Каракаш², А. Э. Волошин¹

¹Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Москва, Россия

²НПП “Доза”, Зеленоград, Россия

*E-mail: mlyasnikova@yandex.ru

**E-mail: postva@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.04.2023 г.

После доработки 22.05.2023 г.

Принята к публикации 23.05.2023 г.

Монокристаллы *транс*-стильбена представляют большой интерес как сцинтилляторы, характеризующиеся высоким световыходом. Используя метод роста из раствора анизол, выращены объемные монокристаллы *транс*-стильбена. Получены спектры пропускания, фотолюминесценции и исследована кинетика распада фотолюминесценции монокристалла. Также исследованы сцинтилляционные свойства элемента ($17 \times 12 \times 5$ мм), изготовленного из выращенного кристалла *транс*-стильбена при облучении γ - и рентгеновским излучением. Показано, что световыход полученного кристалла не уступает световыходу сцинтилляционного детектора на основе кристалла *транс*-стильбена (31.5×10 мм), выращенного из расплава.

DOI: 10.31857/S0023476123600271, EDN: IDFSUN

ВВЕДЕНИЕ

Сцинтилляторы на основе органических люминофоров являются эффективными материалами для детектирования α -, β -излучений и быстрых нейтронов на фоне γ -излучения в связи с их низким атомным номером ($Z_{\text{эф}} \sim 7$), а также могут представлять интерес для оценки биологического воздействия в дозиметрии. Их важным достоинством является малое время высвечивания (~ 1 нс) по сравнению с неорганическими сцинтилляторами (~ 10 нс и более) [1, 2]. Органические сцинтилляторы обладают высокой прозрачностью к собственной люминесценции, что позволяет изготавливать сцинтилляционные детекторы большого размера. При этом длина волны их излучения лежит вблизи максимума кривой спектральной чувствительности наиболее широко применяемых фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), что обеспечит высокую эффективность детекторов на их основе [2]. Все это обуславливает важную роль органических сцинтилляторов в фундаментальных и прикладных исследованиях.

В сравнении с жидкими, пластиковыми и поликристаллическими материалами сцинтилляторы на основе органических монокристаллов обладают большей прозрачностью, высоким спектральным разрешением и наибольшим световыходом [2, 3]. Для выращивания объемных

органических кристаллов в основном применяются методы роста из расплава [4–6]. Отличительные особенности получаемых кристаллов — отсутствие огранки, наличие большого количества дефектов и низкая термомеханическая прочность [7–9].

Традиционные методы получения неорганических кристаллов из водных растворов могут быть успешно использованы для выращивания органических монокристаллов [10, 11]. Кристаллы, выращенные из растворов, по оптическому качеству (прозрачность) предпочтительнее кристаллов, полученных с помощью расплавных методов, а по сцинтилляционным свойствам им не уступают [6, 10, 11]. Однако в настоящее время методы роста объемных органических монокристаллов размером от 20 мм из раствора еще слабо развиты.

Получение объемных монокристаллов *транс*-стильбена из раствора анизол описано в [12]. Кристаллы высотой до 10 см были получены на затравках-столбиках, ориентированных вдоль оси *b*. Показано, что световыход монокристаллов *транс*-стильбена увеличивается с повышением степени чистоты исходных реактивов.

Среди органических сцинтилляторов *транс*-стильбен характеризуется высокой способностью к разделению различных типов излучений [10].

Он обладает большей радиационной стойкостью, чем *пара*-терфенил, нафталин и антрацен [1]. В сравнении с антраценом *транс*-стильбен, хотя и обладает несколько меньшим световым выходом, длительность сцинтилляции у него значительно короче (6.4 нс для возбуждения γ -излучением [1] и 8.5 нс для возбуждения α -излучением [13]), что позволяет использовать его в тех экспериментах, где требуется регистрация очень интенсивного излучения. Внешний квантовый выход фотолюминесценции кристалла *транс*-стильбена достигает $\Phi_F = 63\text{--}65\%$, что сопоставимо со значениями Φ_F для кристаллов антрацена и *пара*-терфенила [13]. А для растворов *транс*-стильбена величина Φ_F меньше 10% [14]. Согласно [15] кристалл стильбена является оптимальным детектирующим элементом в системе регистрации нейтронных потоков и спектрометрии нейтронного излучения термоядерной плазмы.

Цель данного исследования — разработка метода выращивания из раствора объемных монокристаллов *транс*-стильбена и исследование их спектрально-люминесцентных характеристик при УФ-возбуждении и сцинтилляционных свойств при воздействии γ - и рентгеновского излучений для использования их в качестве элемента сцинтилляционного детектора.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы. Для выращивания кристаллов использовали коммерческий *транс*-стильбен (ос.ч.) и анизол (ос.ч.) в качестве растворителя. Для повышения чистоты *транс*-стильбена и увеличения стабильности раствора исходный реактив был перекристаллизован в толуоле (ос.ч.).

Рост кристаллов. Кристаллы выращивали из раствора *транс*-стильбена в анизоле методом снижения температуры в кристаллизаторах объемом 2 л, оборудованных системой автоматического регулирования температуры с точностью $\pm 0.02^\circ\text{C}$ и системой перемешивания раствора с возможностью плавной регулировки скорости вращения мешалки [16, 17]. Крышка кристаллизатора была изготовлена из устойчивого к воздействию органических растворителей капролона, а мешалка раствора и платформа для кристалла — из алюминия [11].

Рост кристаллов *транс*-стильбена осуществляли путем заливки подготовленного раствора в кристаллизатор с установленным затравочным кристаллом и последующим контролируемым снижением температуры раствора в течение 30 дней. Средняя скорость снижения температуры составляла $0.8^\circ/\text{сут}$.

Для ростовых экспериментов использовали затравочные кристаллы длиной до 3 см, вытянутые вдоль оси *b*, полученные из растворов *транс*-

стильбена в толуоле при комнатной температуре при изотермическом испарении растворителя. Перед вклеиванием в ростовую платформу затравочные кристаллы подвергали механической обработке.

Раствор *транс*-стильбена в анизоле для выращивания монокристаллов выдерживали при температуре насыщения ($T_{\text{нас}}$) в течение нескольких дней при постоянном перемешивании для достижения равновесного состояния. Затем раствор перегревали на $10\text{--}15^\circ\text{C}$ выше температуры насыщения и фильтровали через фильтр Шотта. Полученный раствор заливали в прогретый кристаллизатор с заранее помещенной туда платформой с затравочным кристаллом, раствор охлаждали до температуры $T \leq T_{\text{нас}}$. Перед достижением равновесной температуры раствора поверхность затравочного кристалла частично растворялась. Средняя скорость роста кристалла в направлении $[010]$ составила $0.8\text{--}0.9$ мм/сут.

Рентгенофазовый анализ. Фазовый анализ монокристаллического образца ($17 \times 12 \times 5$ мм) и определение его кристаллографической ориентации выполнены на рентгеновском дифрактометре Miniflex 600 (Rigaku, Япония). Излучение $\text{CuK}\alpha$, $\lambda = 1.54178$ Å.

Рентгеновская топография. Реальную структуру кристалла изучали методом проекционной рентгеновской топографии по Лангу. Рентгеновская топограмма образца получена в отражении от плоскостей (210) (угол Брэгга $\theta = 5^\circ$, межплоскостное расстояние $d = 4.065$ Å) в излучении $\text{MoK}\alpha_1$. Съемки проводили на установке ДТС производства СКБ ИК АН, изображения фиксировали на пластинки для ядерных исследований MP-10 с толщиной эмульсии 10 мкм.

Оптическая спектроскопия. Для определения степени чистоты перекристаллизованного *транс*-стильбена измеряли спектры поглощения и фотолюминесценции ($\Phi\text{Л}$) растворов в *n*-гексане в кварцевой кювете размером 10×10 мм.

Спектр $\Phi\text{Л}$ монокристалла толщиной $d_1 = 1$ мм регистрировали при его расположении под углом 45° к возбуждающему лучу. Измерение спектров проводили с помощью спектрофотометра Shimadzu UV-3101PC и спектрофлуориметра Shimadzu RF-5301PC. Возбуждение люминесценции в растворе и кристалле проводилось при 295 и 275 нм соответственно.

Спектр пропускания монокристаллического элемента из *транс*-стильбена толщиной $d_2 = 5$ мм измеряли на автоматическом двулучевом спектрофотометре Cary 300 UV-Vis.

Времена жизни $\Phi\text{Л}$. Затухание $\Phi\text{Л}$ монокристалла *транс*-стильбена толщиной $d_1 = 1$ мм измеряли с помощью спектрофлуориметра с время-коррелированным счетом фотонов FluoTime 300



Рис. 1. Схема установки для исследования световыхода (а) и сцинтилляционный детектор на основе монокристалла стильбена (“эталон 1”) (б).

(PicoQuant, Германия). Возбуждение ФЛ проводилось на длине волны 275 нм (импульсный светодиод PLS 270-10). Сигнал регистрировали в области максимума ФЛ ($\lambda_{em} = 380$ нм). Функцию отклика прибора регистрировали на рассеивающем образце шлифованного кварцевого стекла сразу после измерения кривой затухания. Для определения времени жизни ФЛ аппроксимацию кривой затухания проводили с применением моноэкспоненциальной модели с помощью программного пакета Easytau 2.

Сцинтилляционные свойства. Исследование световыхода полученного образца проводили на установке, схема которой представлена на рис. 1а. В качестве детектора использовали ФЭУ R-10131 (Hamamatsu, Япония). Для улучшения светосбора от исследуемого сцинтиллятора использовали оптическую смазку ВС-630 (Saint-Gobain, США). Токовый сигнал с ФЭУ подавали на интегрирующий усилитель БУИ 3-К с постоянной времени интегрирования 2 мкс. Сформированный сигнал оцифровывали с помощью АЦП USB-ADC-4 К (Парсек, Россия). В качестве образцов сравнения использовали сцинтилляционный детектор на основе выращенного из расплава монокристалла стильбена цилиндрической формы размером 31.5×10 мм (п.я. Г-4319, ТУ-6-09-2101-79, СССР, 1982 г.) — “эталон 1” (рис. 1б) и пластмассовый сцинтиллятор ВС-408 (Bicron, США) — “эталон 2”. Для улучшения светосбора от исследуемых образцов использовали алюминизированную майларовую (лавсановую) пленку, которую размещали на кристалле-сцинтилляторе со стороны источника излучения. В качестве источников ионизирующего излучения использовали образцовые спек-

трометрические γ -источники (ОСГИ) Am-241 (59.5 кэВ — γ -линия, 13.9 кэВ — рентгеновская линия), Cd-109 (23.5 кэВ), Ba-133 (31.3 кэВ), Eu-152 (40 кэВ) [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рост кристаллов. Выращен монокристалл *транс*-стильбена размером $56 \times 45 \times 33$ мм (рис. 2). Для исследования сцинтилляционных свойств из полученного кристалла вырезали образец размером $17 \times 12 \times 5$ мм (рис. 3). Его рабочие грани, параллельные плоскости (001), были отполированы.

Рентгенофазовый анализ и морфология кристалла. Кристаллическая структура *транс*-стильбена моноклинная, пр. гр. $P2_1/a$ ($Z = 4$), параметры элементарной ячейки: $a = 12.4056(7)$, $b = 5.7411(3)$, $c = 15.7977(8)$ Å; $\beta = 111.8510(10)^\circ$ [19].

Рентгеновская дифрактограмма монокристаллического образца *транс*-стильбена, снятая при отражении от грани (001), приведена на рис. 4. Полученные результаты хорошо согласуются со структурными данными [19], приведенными на этом же рисунке. Спектр дифракционных рефлексов исследуемого кристалла представляет собой набор узких пиков, положения которых приблизительно кратны положению первого максимума при $2\theta_1 = 6.06^\circ$ и соответствуют кратным отражениям от плоскостей {001}.

Реконструкция морфологии кристалла *транс*-стильбена, выполненная с помощью программы WinXMorph [20] на основе структурных данных [19], представлена на рис. 5а. Для сравнения показан выращенный монокристалл с выделенны-

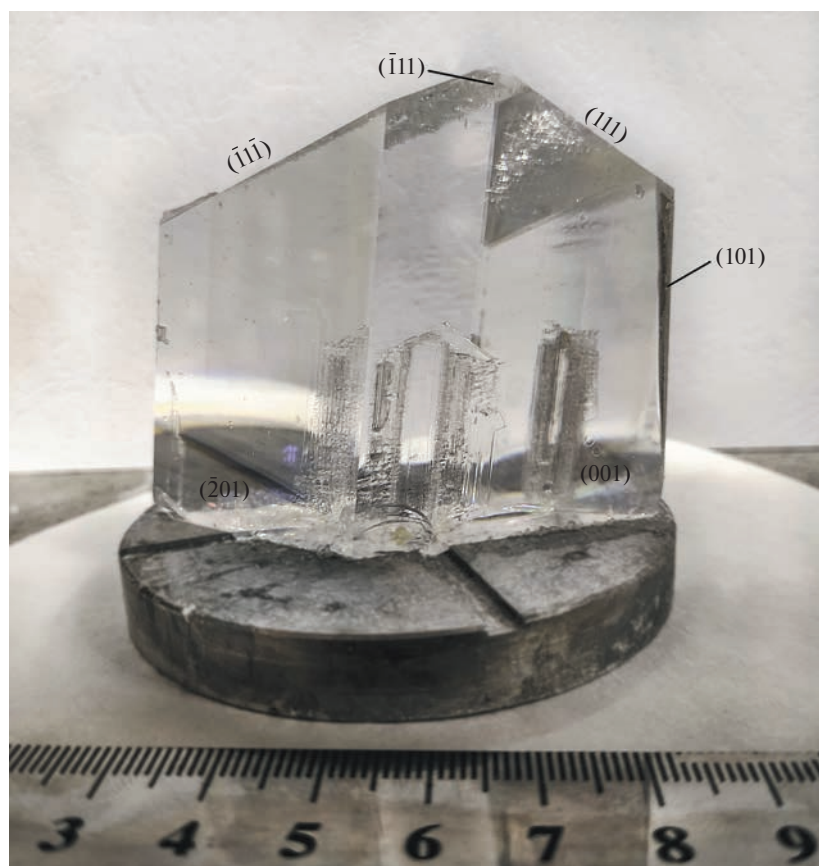


Рис. 2. Монокристалл *транс*-стильбена на ростовой платформе.

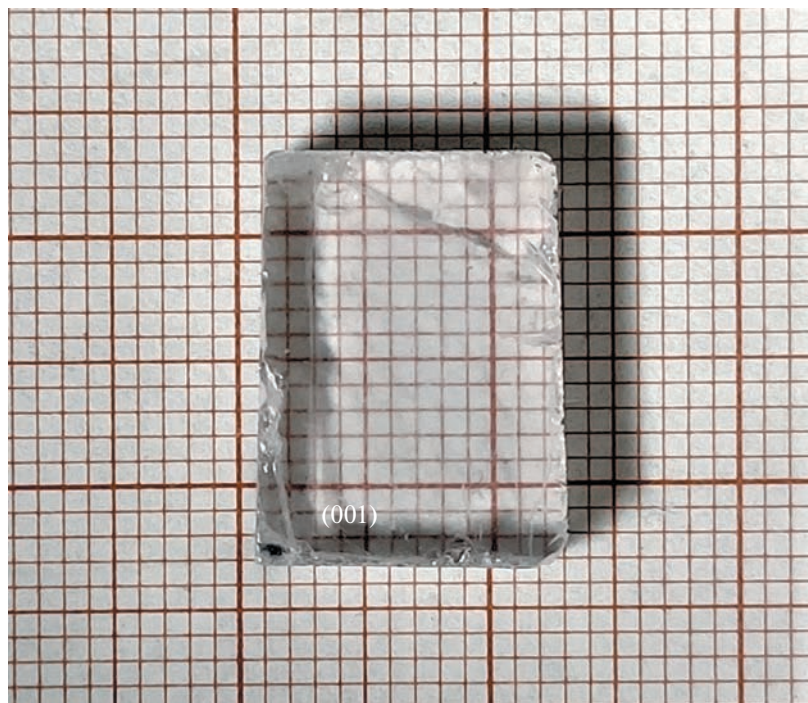


Рис. 3. Образец, вырезанный из монокристалла *транс*-стильбена.

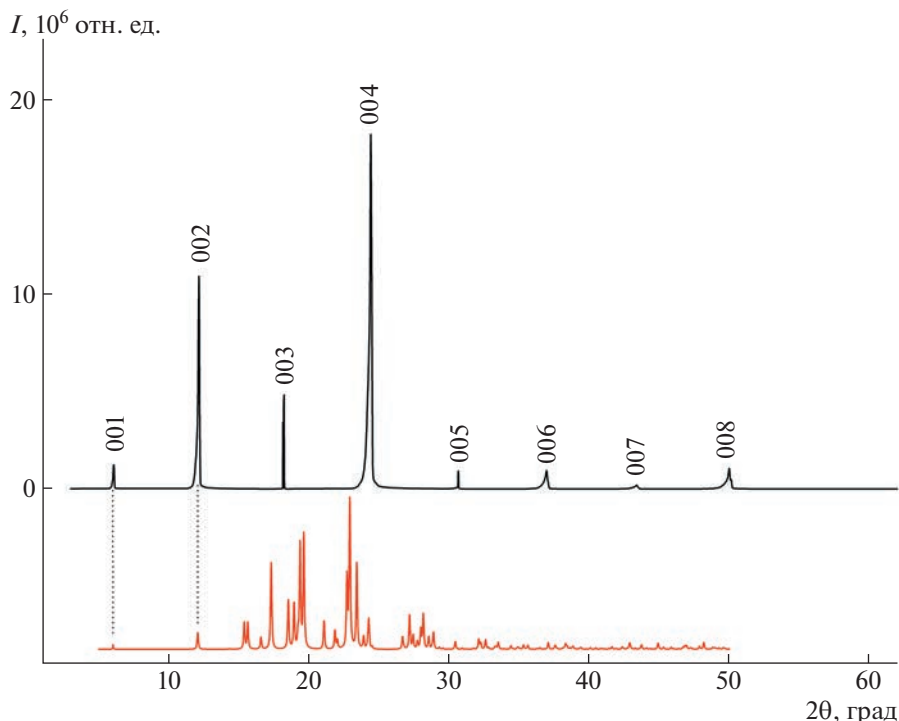


Рис. 4. Рентгеновская дифрактограмма монокристаллического образца *транс*-стильбена (вверху) и расчетная порошковая дифрактограмма [19] (внизу).

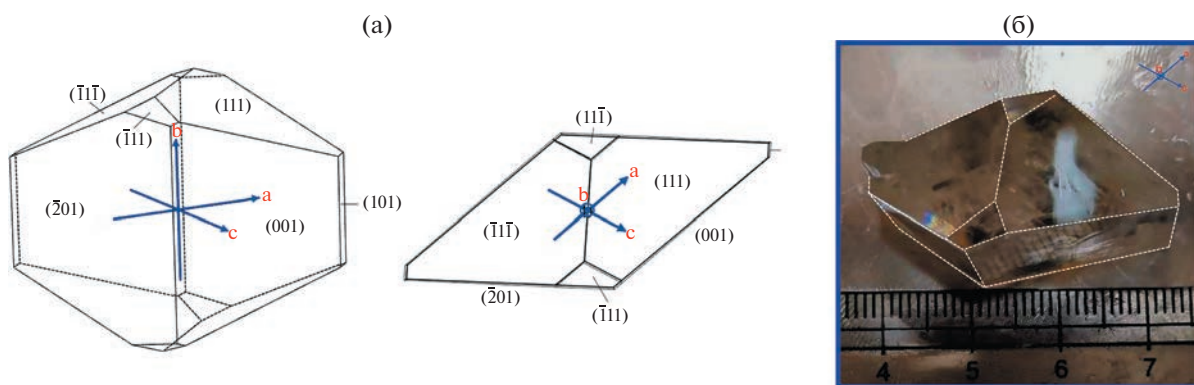


Рис. 5. Габитус кристалла *транс*-стильбена (а) и выращенный монокристалл с соответствующей огранкой (б).

ми белым пунктиром ребрами (рис. 5б). У выращенных кристаллов грани $(\bar{2}01)$, (001) , $(\bar{1}1\bar{1})$ и (111) оказались наиболее выражены, а грани (101) , $(\bar{1}11)$ и $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ вырождаются (рис. 2, 5б).

Рентгеновская топография. На рис. 6а представлена рентгеновская топограмма монокристаллического образца, его участки А и В имеют разный контраст. Участок А принадлежит сектору роста грани (001) , но, поскольку образец был вырезан из верхней части этого ростового сектора, по всей видимости, участок В принадлежит сектору роста грани $(\bar{1}1\bar{1})$. Сдвиг угла Брэгга меж-

ду участками А и В составляет $\sim 0.1^\circ$. Поскольку $\Delta\theta = \frac{\Delta d}{d} \operatorname{ctg} \theta$, разницу межплоскостных расстояний между этими участками можно оценить как $\Delta d \approx 6 \times 10^{-4} \text{ \AA}$.

Вблизи границы между участками А и В (т.е. вблизи секториальной границы) располагается протяженное полое (заполненное раствором) включение 1, оптическое изображение которого показано на рис. 6б. Внутренний размер включения составляет $\sim 800 \text{ мкм}$. Внутренние стенки включения гладкие и предположительно ограни-

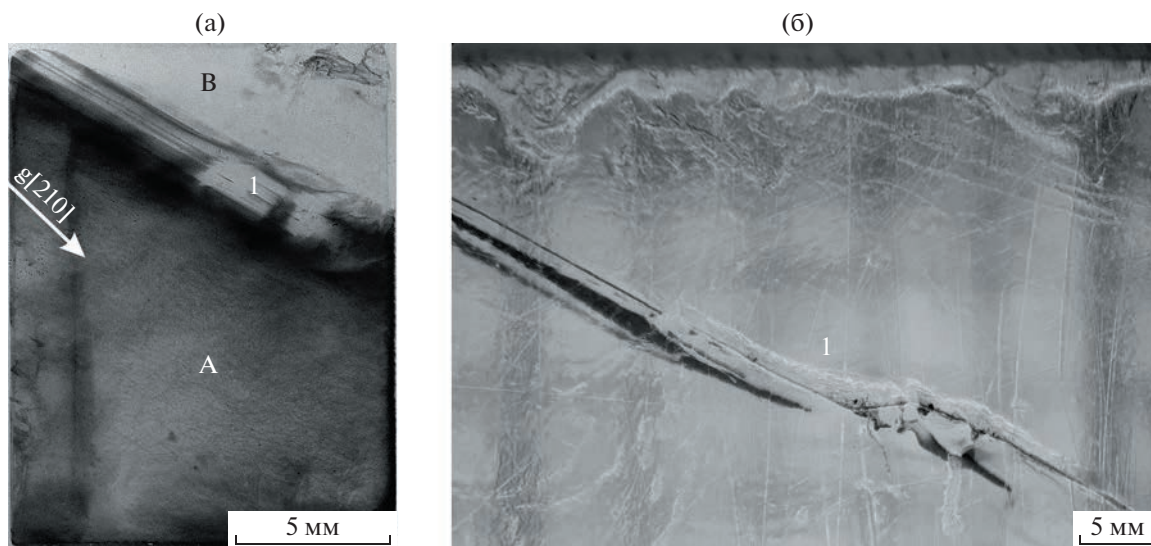


Рис. 6. Рентгеновская топограмма образца (рис. 3), $g[210]$ (а) и микрофотография включения в нем (б). А и В – участки секторов роста граней (001) и $(\bar{1}11)$ соответственно, 1 – включение.

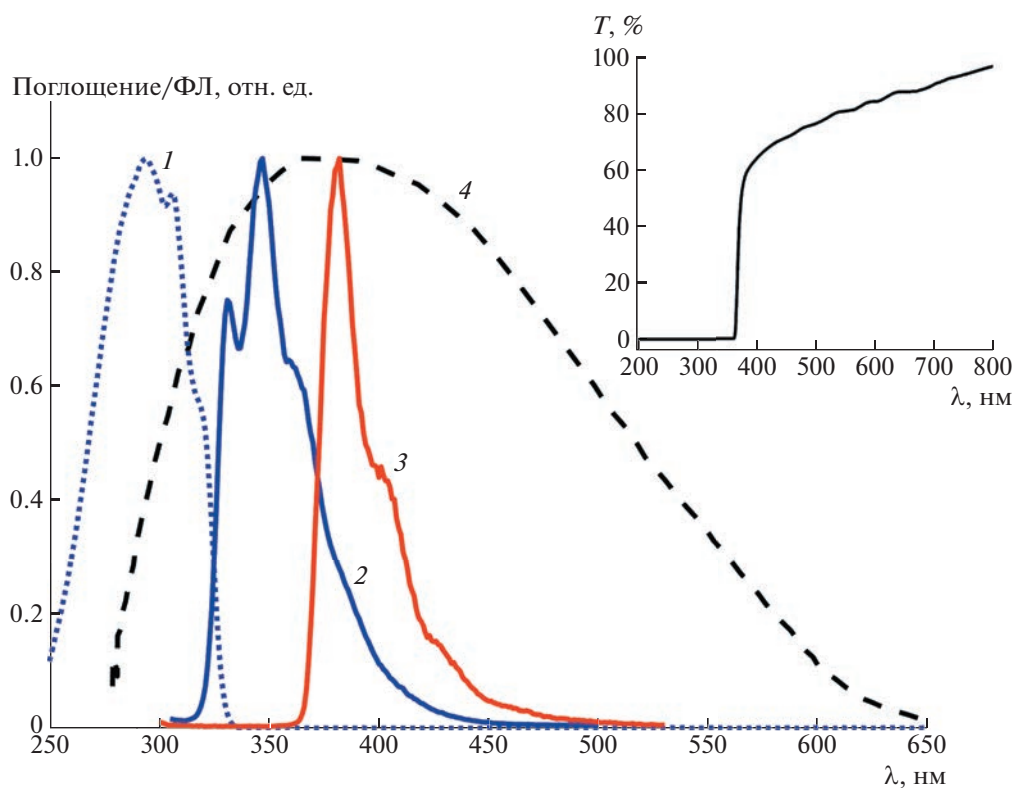


Рис. 7. Нормированные спектры оптического поглощения (1) и фотолуминесценции (2) раствора *транс*-стильбена в *n*-гексане; спектр ФЛ монокристалла *транс*-стильбена толщиной $d_1 = 1$ мм (3); аппаратная функция фотокатода детектора R10131 в единицах квантовой эффективности (4). На вставке в правом верхнем углу изображения – спектр пропускания образца на основе монокристалла *транс*-стильбена ($d_2 = 5$ мм).

ны плоскостями $\{111\}$. Отметим, что данное включение не привело к генерации дислокаций в отличие от описанных в [21]. Изученный образец не содержит дислокаций, что говорит о низком уровне упругих напряжений в нем.

Оптико-люминесцентные свойства растворов и кристаллов. На рис. 7 представлены спектры поглощения и ФЛ раствора в *n*-гексане (кривые 1 и 2 соответственно), спектр ФЛ монокристалла (кривая 3). Также на данном рисунке представле-

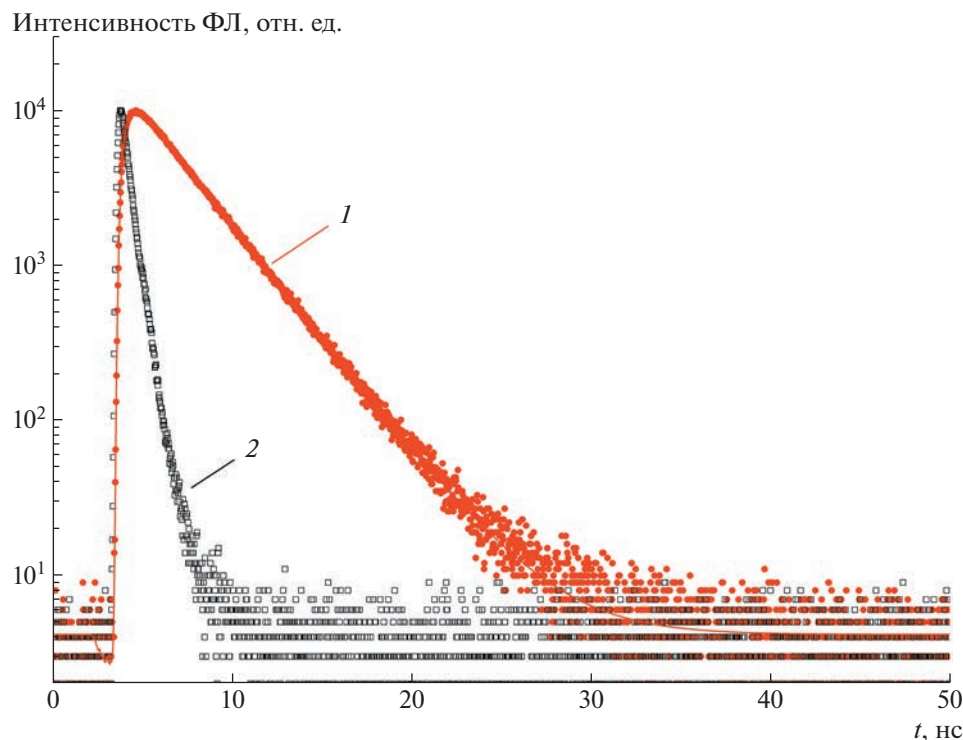


Рис. 8. Кинетика затухания фотолюминесценции кристалла *транс*-стильбена (1) и функция отклика прибора (2).

на аппаратная функция фотокатода ФЭУ R-10131 (кривая 4), используемого для измерения сцинтилляционных свойств изготовленного образца на основе монокристалла *транс*-стильбена (рис. 3).

В спектре поглощения раствора видна колебательная структура с максимумом при 294 нм (оптическая плотность в максимуме составляла 0.95), локальным максимумом на 306 нм и плечом в области 320 нм. На спектрах люминесценции наблюдаются колебательная структура с максимумами при 331, 346 нм и плечом в области 360 нм. Формы и максимумы спектров поглощения и люминесценции соответствуют известным из данных [22], что указывает на отсутствие других флуорофоров.

Спектр ФЛ монокристалла батохромно смещен относительно спектра ФЛ раствора приблизительно на 70 нм. Максимум в спектре люминесценции кристалла наблюдается при 382 нм, а также наблюдаются плечи в области 404 и 427 нм с большой и малой интенсивностями соответственно. Максимум спектра лежит в области максимальной чувствительности фотодетектора R-10131 (кривая 4 на рис. 7). Положение и величина максимумов спектра фотолюминесценции соответствуют представленным в литературе для кристалла размером $5 \times 5 \times 0.5$ мм, полученного из расплава [13].

На врезке рис. 7 представлен спектр пропускания кристаллического образца (рис. 3). В интервале от 385 до 360 нм оптическое пропускание стремительно падает до нуля и для более коротковолнового УФ-излучения материал непрозрачен. В интервале длин волн от 400 до 800 нм пропускание монокристаллического образца возрастает с 65 до 97%. Отметим, что изготовленный образец кристалла толщиной 5 мм заметно превосходит по оптическому пропусканию монокристаллический отполированный элемент толщиной 1 мм, вырезанный из выращенного из расплава по методу Бриджмена монокристалла *транс*-стильбена [6].

Кривая затухания ФЛ кристалла *транс*-стильбена представлена на рис. 8. Определенное в результате аппроксимации кривой затухания время жизни ФЛ составило $\tau = 3.0$ нс. Полученное значение τ для УФ-возбуждения хорошо согласуется с измеренным в [23] временем жизни радиолюминесценции кристалла *транс*-стильбена при γ -возбуждении.

Сцинтилляционные свойства. На рис. 9 приведен амплитудный спектр источника Am-241 для монокристалла стильбена и образцов сравнения. В зарегистрированных спектрах пики полного поглощения аппроксимировали функцией Гаусса.

На рис. 10 приведены графики зависимости положения пиков полного поглощения от энер-

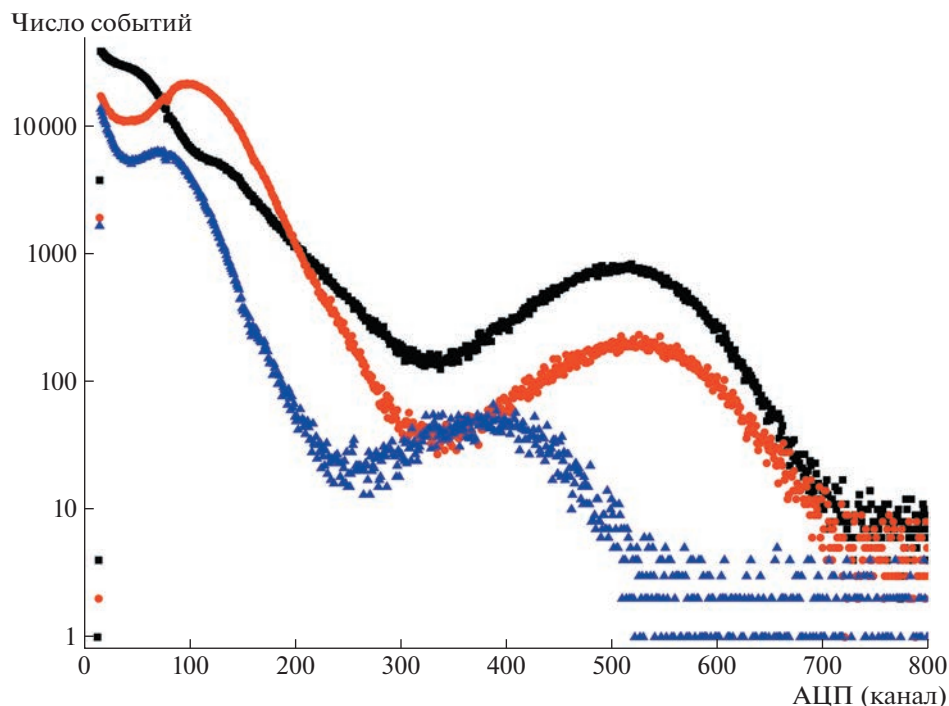


Рис. 9. Спектр источника Am-241 для монокристаллического образца *транс*-стильбена (●) и образцов сравнения “эталон 1” (■) и “эталон 2” (▲).

гии гамма/рентгеновских квантов источников Am-241, Cd-109, Ba-133, Eu-152 для образца монокристалла стильбена и образца сравнения “эталон 1”.

По данным, представленным на рис. 10, была рассчитана чувствительность, которая составила:

- для монокристаллического элемента *транс*-стильбена 8.94 ± 0.39 (канал/кэВ);
- для “эталона 1” 8.86 ± 0.39 (канал/кэВ).

Из полученных результатов видно, что световых выход выращенного из раствора кристалла не уступает образцу сравнения на основе выращенного из расплава кристалла *транс*-стильбена (“эталон 1”) и почти на 30% превосходит световых выход коммерческого пластмассового сцинтиллятора (“эталон 2”). Отметим, что при оптимизации светосбора световых выход монокристаллического элемента *транс*-стильбена может быть заметно выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан способ выращивания объемных монокристаллов *транс*-стильбена из раствора анизол методом снижения температуры. Изготовленный образец размером $17 \times 12 \times 5$ мм на основе выращенного монокристалла *транс*-стильбена характеризуется высокой оптической прозрачностью в видимом и ближнем ИК-диапазонах. Время жизни ФЛ для монокристаллического образца при возбуждении УФ-излучением (273 нм) составляет $\tau = 3.0$ нс. Световых выход образца при облучении γ -излучением от источников Am-241, Cd-109, Ba-133, Eu-152 не уступает сцинтилляционному детектору на основе выращенного из расплава кристалла *транс*-стильбена (ТУ-6-09-2101-79) и почти на 30% больше, чем у

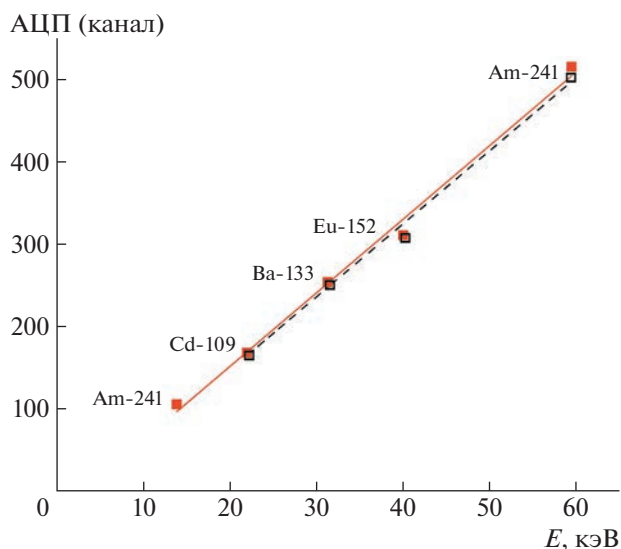


Рис. 10. Относительный световых выход для монокристаллического образца *транс*-стильбена (■) и образца сравнения “эталон 1” (□) в зависимости от энергии гамма/рентгеновских квантов.

коммерческого пластмассового сцинтиллятора ВС-408. Таким образом, полученные из раствора монокристаллы *транс*-стильбена имеют большой потенциал для применения в качестве сцинтилляционных детекторов ионизирующих излучений.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант № 075-15-2021-1362). В работе использовано оборудование ЦКП “Структурная диагностика материалов” ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Birks J.B.* The Theory and Practice of Scintillation Counting: International Series of Monographs on Electronics and Instrumentation. Pergamon Press Ltd, 1967. 662 p.
2. *Красовицкий Б.М., Болотин Б.М.* Органические люминофоры. 2-е изд. М.: Химия, 1984. 336 с.
3. *Gorbacheva T.E., Galunov N.Z., Lazarev I.V. et al.* // J. Appl. Spectrosc. 2014. V. 81. P. 164. <https://doi.org/10.1007/s10812-014-9904-y>
4. *Arulchakkaravarthi A., Lakshmanaperumal C.K., Sathyanarayanan P. et al.* // J. Cryst. Growth. 2002. V. 246. P. 85. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(02\)01696-2](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(02)01696-2)
5. *Ai Q., Chen P., Feng Y., Xu Y.* // AIP Conf. Proc. 2017. V. 1879. <https://doi.org/10.1063/1.5000464>
6. *Yamato S., Yamaji A., Kurosawa S. et al.* // Opt. Mater. 2019. V. 94. P. 58. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.04.051>
7. *Hong I.H., Tan K.J., Toh M. et al.* // J. Cryst. Growth. 2013. V. 363. P. 61. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2012.10.002>
8. *Bhukkal S., Kumar B.* // J. Cryst. Growth. 2020. V. 535. P. 125534. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2020.125534>
9. *Будаковский С.В., Крайнов И.П., Мнацканова Т.Р., Ткаченко В.Ф.* Сцинтиллятор на основе монокристалла стильбена и способ его получения: патент SU 948171 A1. СССР: Государственный комитет по делам изобретений и открытий, 1998.
10. *Zaitseva N.P., Newby J., Hamel S. et al.* // Hard X-Ray, Gamma-Ray, and Neutron Detector Physics XI. 2009. V. 7449. P. 744911. <https://doi.org/10.1117/12.829870>
11. *Zaitseva N., Carman L., Glenn A. et al.* // J. Cryst. Growth. 2011. V. 314. P. 163. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2010.10.139>
12. *Carman L., Zaitseva N., Martínez H.P. et al.* // J. Cryst. Growth. 2013. V. 368. P. 56. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2013.01.019>
13. *Katoh R., Katoh S., Furube A. et al.* // J. Phys. Chem. C. 2009. V. 113. P. 2961. <https://doi.org/10.1021/jp807684m>
14. *Birks J.B.* Photophysics of aromatic molecules. London: Wiley-Interscience, 1970. 704 p.
15. *Клименков Е.Е., Кашук Ю.А., Красильников и др.* // Приборы и техника эксперимента. 2004. Т. 2. С. 35.
16. *Маноменова В.Л., Степнова М.Н., Гребенев В.В. и др.* // Кристаллография. 2013. Т. 58. С. 505. <https://doi.org/10.7868/s0023476113030156>
17. *Руднева Е.Б., Маноменова В.Л., Волошин А.Э.* // Кристаллография. 2018. Т. 63. С. 963. <https://doi.org/10.1134/s0023476118060255>
18. <http://www.lnhb.fr/nuclear-data/nuclear-data-table/>
19. *Harada J., Ogawa K.* // J. Am. Chem. Soc. 2001. V. 123. P. 10884. <https://doi.org/10.1021/ja011197d>
20. *Kaminsky W.* // J. Appl. Cryst. 2007. V. 40. P. 382. <https://doi.org/10.1107/S0021889807003986>
21. *Klapper H., Zaitseva N., Carman L.* // J. Cryst. Growth. 2015. V. 429. P. 74. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2015.07.012>
22. *Tranca D.C., Neufeld A.A.* // J. Chem. Phys. 2009. V. 130. P. 141102. <https://doi.org/10.1063/1.3116786>
23. *Harihar P., Chen H., Stapor W.J.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 1994. V. 345. P. 500. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)90506-1](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)90506-1)