

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОКСОСЕЛЕНИДОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИЧЕСКОЙ ЧИСТОТЫ

В. В. Малиютина-Бронская^{1*}, А. С. Сорока¹, Д. В. Сенкевич¹,
М. С. Тарасенко², А. А. Рядун², Н. Г. Наумов²

УДК 535.3;539.216.1

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2022-89-5-626-631>

¹ ГНПО “Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника”,
Минск, Беларусь; e-mail: malyutina@oelt.basnet.by

² Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН,
Новосибирск, Россия; e-mail: tarasen@niic.nsc.ru

(Поступила 14 мая 2022)

Исследованы оптические свойства легированных оксоселенидов редкоземельных элементов оптической чистоты $RE_2O_2Se:RE'$ ($RE = Gd, Y$; $RE' = Sm, Tb$). Фотолюминесцентные свойства оксоселенидов редкоземельных элементов оптической чистоты в виде порошков и тонких пленок демонстрируют принципиальную возможность использования их в качестве сцинтилляционного материала для детекторов ультрафиолетового или ионизирующих излучений.

Ключевые слова: оксоселенид, редкоземельный элемент, фотолюминесценция, ультрафиолетовое излучение, спектр переизлучения.

The optical properties of doped oxoselenides of rare-earth elements of optical purity $RE_2O_2Se:RE'$ ($RE = Gd, Y$; $RE' = Sm, Tb$) are studied. Photoluminescent properties of oxoselenides of rare earth elements of optical purity in the form of powders and thin films demonstrate the fundamental possibility of using them as a scintillation material for detectors of ultraviolet or ionizing radiation.

Keywords: oxoselenide, rare earth element, photoluminescence, ultraviolet radiation, re-emission spectrum.

Введение. Сцинтилляционные оптические материалы, к которым относятся и новые малоизученные материалы оксоселениды, могут найти широкое применение в датчиках ультрафиолетовых (УФ) и ионизирующих излучений. Сцинтилляционный метод регистрации излучения основан на фиксировании коротких вспышек света — сцинтилляций, возникающих в некоторых веществах при прохождении через них заряженных частиц [1, 2]. Сцинтилляционный детектор состоит из сцинтиллятора и прибора, преобразующего световые вспышки в электрический сигнал (например, лавинного фотодиода (ЛФД) или фотоэлектронного умножителя (ФЭУ)) [2—4]. Кремниевые ЛФД и ФЭУ в отличие от вакуумных ФЭУ имеют малые габаритные размеры, низкое напряжение питания и не обладают чувствительностью к магнитному полю, что является важной характеристикой для их широкого использования в детекторах излучений [4]. Для практического применения новых оптических сцинтилляционных материалов в детекторах излучения необходимо согласовать оптические параметры: область спектральной чувствительности приемника излучения (Si-ЛФД и Si-ФЭУ) и спектральный диапазон фотолюминесценции (ФЛ) сцинтилляционного материала.

OPTICAL PROPERTIES OF RARE-EARTH ELEMENTS OXOSELENIDES OF OPTICAL PURITY

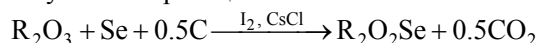
V. V. Malyutina-Bronskaya^{1*}, A. S. Soroka¹, D. V. Senkevich¹, M. S. Tarasenko², A. A. Ryadun², N. G. Naumov² (¹ SSPA “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology”, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus; e-mail: malyutina@oelt.basnet.by; ² A. V. Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia; e-mail: tarasen@niic.nsc.ru)

В настоящее время активно исследуются сцинтилляторы на основе оксосульфидных матриц $\text{RE}_2\text{O}_2\text{S}$ ($\text{RE} = \text{Y}, \text{Gd}$). Например, предложено использование $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}$ или $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}$ в качестве сцинтиллятора для контроля в режиме реального времени при брахиотерапии с источником ^{192}Ir [5]. Люминофор на основе $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}, \text{Sm}$ представляет интерес в качестве сцинтиллятора рентгеновского излучения для медицинского дозиметра, работающего в режиме реального времени [6], сцинтиллятора из $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}$ из-за наблюдаемой высокой интенсивности сигнала — для дозиметрии малых доз облучения в реальном времени [7]. Коммерческий люминофор марки P43 (на основе $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}$) используется для создания детектора нейтронов [8].

Оксоселениды редкоземельных элементов (PЗЭ) $\text{RE}_2\text{O}_2\text{Se}$ ($\text{RE} = \text{Y}, \text{Gd}$) являются широкозонными полупроводниками с оптической шириной запрещенной зоны >3 эВ [9]. Их строение аналогично известным оксосульфидам, при этом за счет более тяжелых атомов селена (по сравнению с атомами серы) они обладают большей плотностью и, соответственно, большим коэффициентом ослабления, что позволяет материалу люминофора эффективнее поглощать высокоэнергетическое излучение. Действительно, замена серы на селен в изоструктурных оксохалькогенидах PЗЭ должна улучшать люминесцентные и сцинтилляционные характеристики материала. Это может быть обусловлено увеличением среднего заряда ядер атомов, входящих в состав вещества, приводящим к повышению коэффициента ослабления [10].

Цель настоящей работы — исследование оптических свойств легированных редкоземельными элементами оксоселенидов для возможного применения в детекторах УФ и ионизирующих излучений.

Методика синтеза и методы исследования. Синтез порошков оксоселенидов PЗЭ $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{Se}:\text{R}$ ($\text{R} = \text{Pr}, \text{Sm}, \text{Tb}$) или $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se}:\text{R}$ ($\text{R} = \text{Pr}, \text{Sm}, \text{Tb}$) с размерами кристаллитов 100—1500 мкм (рис. 1, а, б) проведен по методикам [9, 11]. Смешанные оксиды получены растворением навесок требуемой стехиометрии в разбавленной азотной кислоте (1 М), затем совместно осаждены аммиаком в виде гидроксидов. Полученные гелеобразные осадки сушились на воздухе и прокаливались в печи при 950 °С в течение 24 ч. Оксоселениды получены по реакции:



Для этого оксиды PЗЭ , селен и уголь, взятые в стехиометрическом соотношении, помещались в кварцевую ампулу с небольшим количеством элементарного иода. CsCl взят в трехкратном избытке относительно массы оксида. Во избежание удаления иода ампула охлаждалась в жидком азоте, вакуумировалась и запаивалась. Синтез проводился при температуре 950 °С в течение двух дней. Во избежание взрыва ампулы перед вскрытием охлаждались в жидком азоте. Хлорид цезия удалялся дистиллированной водой, после чего образец промывался этиловым спиртом и сушился на воздухе. Однофазность образцов подтверждалась методом рентгеновской дифракции на дифрактометре Philips PW 1820 с использованием излучения $\text{CuK}_{\alpha\text{cp}}$ (1.5418 Å) (шаг 0.05°, время выдержки 2 с, диапазон измерений $2\theta = 10\text{—}70^\circ$). На рис. 1, а приведена экспериментальная дифрактограмма $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se}:3\%\text{Tb}$ в сравнении с рассчитанной для нелегированного $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se}$. Дифрактограмма показывает однофазность образцов и преимущественную ориентацию в направлении $[00l]$, где l — любое целое число. Такая ориентация вызвана слоистой природой оксоселенида иттрия (рис. 1, б). В результате получено вещество, которое представляет собой крупнокристаллический порошок. Кристаллы имели гексагональную форму, с гадолинием — прозрачные бесцветные, с иттрием — с легким розовым оттенком (рис. 1, в). Для изучения оптических свойств порошков оксоселенидов спектры возбуждения и ФЛ измерялись на спектрометре Fluorolog 3 (Horiba Jobin Yvon) с охлаждаемым модулем детектирования фотонов PC177CE-010, оснащенном фотоумножителем R2658.

Для получения тонкопленочных структур оксоселенидов исходный крупнокристаллический порошок подвергался измельчению на ультразвуковом гомогенизаторе Bandelin HD2200 до размеров 50—200 мкм. Для этого использовалась спиртовая суспензия порошка оксоселенида PЗЭ в пропорции 1 г порошка на 10 мл этилового спирта. После ультразвукового воздействия спиртовая суспензия отстаивалась в течение 30 мин с последующим измерением дисперсности зерен на оптическом микроскопе. Далее спирт термически испарялся и измельченный порошок оксоселенида PЗЭ смешивался с используемым в технологических операциях полиимидом АД-9103 ИС или с золь-гель основой (тетраэтилортосиликатом). Раствор готовился в пропорции золь(полиимид):оксоселенид 10:1. Данное соотношение выбрано опытным путем, чтобы кристаллиты оксоселенида распределялись равномерно по поверхности. В качестве подложек использованы предметные кварцевые стекла размером 76×25 мм² и толщиной 1.0—1.2 мм. Приготовленный раствор с измельченными кристаллитами оксоселенидов наносился с помощью специализированной оснастки. Полученные образцы подвергались отжигу в элект-

ропечи “СНОЛ 3,5” в атмосфере азота при температуре 150 °С (созревание раствора) в течение 30 мин, затем при 300 °С в течение 30 мин (сушка). При таких технологических режимах получались тонкие золь-гель пленки, содержащие кристаллиты оксоселенидов РЗЭ размером 50—200 мкм (рис. 1, з).

Для анализа спектров пропускания в диапазоне 300—1100 нм с шагом 0.25 нм использован спектрофотометр PHOTON RT. Для анализа оптического излучения применялся спектрометр SDH-I и регистратор оптического излучения на основе ПЗС-линейки S11639-01 для регистрации непрерывного и импульсного оптического излучения в диапазоне 200—1000 нм. В качестве источника излучения использован УФ-светодиод ТО-3535BC-UVC265-30-6V-E с максимумом интенсивности излучения 265 нм, размещенный в специализированной оснастке. Измерения проводились в светоизолирующем боксе (рис. 2).

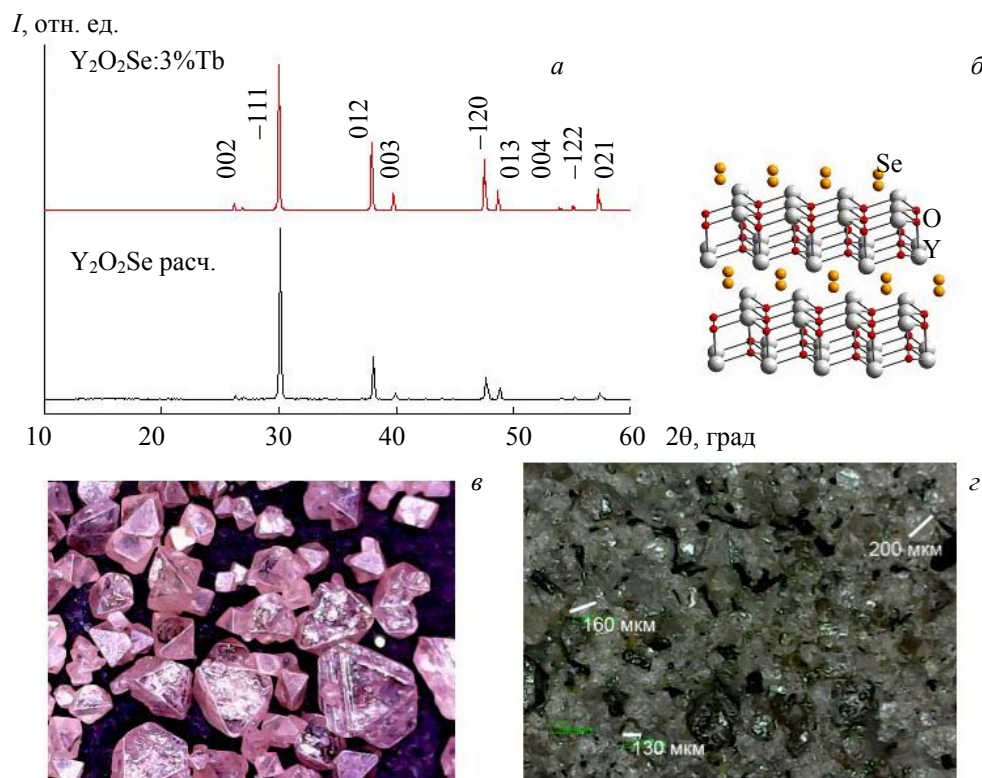


Рис. 1. Дифрактограммы образцов $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se}:3\%\text{Tb}$ в сравнении с рассчитанной для $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se}$ пр.гр. $P-3m$, $a = b = 3.8275 \text{ \AA}$, $c = 6.8008 \text{ \AA}$, $V = 86.28 \text{ \AA}^3$ (а) [9]; упаковка атомов в соединении $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se}$ (б); внешний вид порошка $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se}:3\%\text{Tb}$ (в) и вид измельченного порошка $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se}:3\%\text{Tb}$ (г)

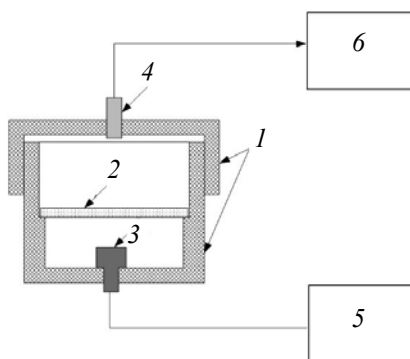


Рис. 2. Блок-схема измерения фотолюминесценции оксоселенидов под воздействием УФ-излучения на просвет: 1 — светонепроницаемый разъемный бокс, 2 — кварцевое стекло для размещения образцов, 3 — УФ-светодиод ТО-3535BC-UVC265, 4 — разъем для оптического световода, 5 — источник питания светодиода, 6 — спектрометр S100 фирмы Solar Laser System

Результаты и их обсуждение. Исследованы фотолюминесцентные свойства синтезированных образцов порошков легированных оксоселенидов РЗЭ. Спектр ФЛ порошка $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se}:1\%\text{Sm}^{3+}$ (рис. 3, а) при возбуждении на $\lambda_{\text{возб}} = 605$ нм демонстрирует переходы ${}^6\text{H}_{5/2} \rightarrow {}^3\text{H}_{7/2}$ (350 нм), ${}^6\text{H}_{5/2} \rightarrow {}^5\text{F}_{9/2}$ (370 нм) и ${}^6\text{H}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{P}_{7/2}$ (385 нм). Спектр ФЛ при $\lambda_{\text{возб}} = 350$ нм содержит переходы ${}^4\text{G}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{5/2}$ (570 нм), ${}^4\text{G}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{7/2}$ (606, 610 нм), ${}^4\text{G}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{9/2}$ (644, 649, 654, 658 нм) и ${}^4\text{G}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{11/2}$ (706, 714 нм). Эти узкие полосы излучения соответствуют характерным переходам в ионе Sm^{3+} с наиболее интенсивным красным излучением при 606 нм (переход ${}^5\text{D}_4 \rightarrow {}^7\text{F}_5$) [9]. Спектр ФЛ порошка $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{Se}:3\%\text{Tb}^{3+}$ (рис. 3, б) при $\lambda_{\text{возб}} = 545$ нм демонстрирует переходы ${}^7\text{F}_6 \rightarrow {}^5\text{D}_2$ (353 нм) и ${}^7\text{F}_6 \rightarrow {}^5\text{D}_3$ (367, 373, 379 нм). Спектр ФЛ при $\lambda_{\text{возб}} = 340$ нм содержит переходы ${}^5\text{D}_4 \rightarrow {}^7\text{F}_6$ (490 нм), ${}^5\text{D}_4 \rightarrow {}^7\text{F}_5$ (545, 549 нм), ${}^5\text{D}_4 \rightarrow {}^7\text{F}_4$ (588 нм) и ${}^5\text{D}_4 \rightarrow {}^7\text{F}_3$ (621 нм). Эти узкие полосы излучения соответствуют характерным переходам в ионе Tb^{3+} с наиболее интенсивным зеленым излучением при 545 нм (переход ${}^5\text{D}_4 \rightarrow {}^7\text{F}_5$) [12].

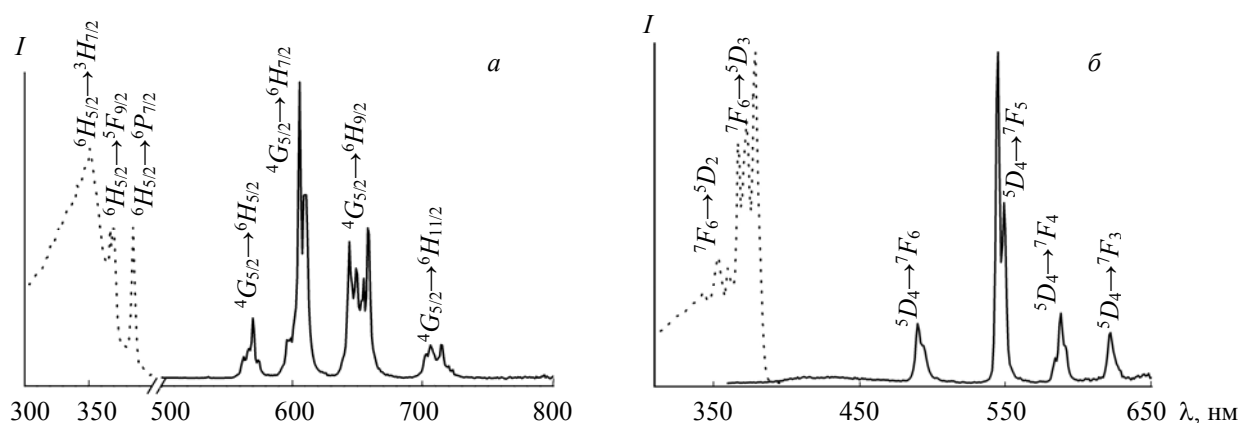


Рис. 3. Спектр ФЛ оксоселенидов (300 К) $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se}:1\%\text{Sm}^{3+}$ (а) [9] и $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{Se}:3\%\text{Tb}^{3+}$ (б) [12], сплошная линия — спектры излучения при $\lambda_{\text{полл}} = 340\text{—}350$ нм, пунктир — спектры поглощения образцов при $\lambda_{\text{полл}} = 545\text{—}605$ нм

Измерены спектры пропускания стекла, золь-гель тонкой пленки и тонкой пленки полиимида АД-9103-ИС на кварце, а также спектры пропускания тонких пленок, содержащих измельченные кристаллиты $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se}:\text{Tb}^{3+}$ в разных средах на кварце. Для кварца характерно пропускание с коэффициентом $T = 90\text{—}93\%$ в диапазоне длин волн $300\text{—}1100$ нм. Нанесение чистого золь-геля и полиимида АД-9103 ИС на кварц приводит к снижению коэффициента пропускания на 10% , однако в случае полиимида окно пропускания смещается в длинноволновую область $450\text{—}1100$ нм. Установлено, что после нанесения на кварц тонких золь-гель пленок с оксоселенидами РЗЭ коэффициент пропускания в диапазоне $300\text{—}1100$ нм резко уменьшается и составляет $4\text{—}5\%$, а для тонких пленок полиимида с оксоселенидами РЗЭ $<1\%$. Аналогичные результаты получены для стеклянных подложек. Исходя из полученных коэффициентов пропускания ($4\text{—}5\%$ в диапазоне $300\text{—}1100$ нм) в качестве основы тонких пленок оксоселенидов РЗЭ выбрана золь-гель пленка.

На рис. 4, а представлены спектры ФЛ тонких пленок с оксоселенидами РЗЭ, измеренные согласно схеме рис. 2. В качестве реперного измерен спектр излучения УФ-светодиода после прохождения чистой золь-гель пленки (без кристаллитов оксоселенида) на кварце. Измерения показывают, что тонкая пленка золь-геля на кварце пропускает весь спектр УФ-светодиода, который имеет основные максимумы при 236 и 278 нм.

ФЛ оксоселенида РЗЭ $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{Se}:3\%\text{Sm}$ наблюдается в видимом ($600\text{—}700$ нм) и ИК-диапазонах (956 и 985 нм) (рис. 4, а, кривая 1). Для $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se}:1\%\text{Pr}$ ФЛ не наблюдается (кривая 2). Для $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se}:3\%\text{Sm}$ ФЛ наблюдается в видимом диапазоне ($600\text{—}700$ нм) (кривая 3), для $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se}:3\%\text{Tb}$ малоинтенсивная ФЛ наблюдается в ИК-диапазоне (956 и 985 нм) (кривая 4). Наличие максимумов в видимой области обусловлено внутриконтинуальным переходом введенных ионов Sm^{3+} или Tb^{3+} . Максимумы в ИК-области (956 и 985 нм) также могут быть обусловлены связанным радикалом, но уже для пары $\text{Y} = \text{Se}$, являющейся частью поверхностной структуры кристалла оксиселенида иттрия, что также подтверждается отсутствием данных полос в спектре чистого оксида иттрия и их наличием для чистого оксоселенида иттрия [13—16]. Однако, как показало исследование, тонкие

пленки с кристаллитами $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se:1\%Pr}$ не проявляют ФЛ в видимой области спектра под воздействием УФ-излучения, в отличие от исходного вещества в виде кристаллического порошка. Это может быть обусловлено технологическими режимами получения тонких пленок данного материала, например, малыми размерами кристаллитов оксоселенидов РЗЭ измельченного порошка. При уменьшении размеров кристаллитов оксоселенидов РЗЭ в пленке интенсивность ФЛ падает, вплоть до полного ее отсутствия.

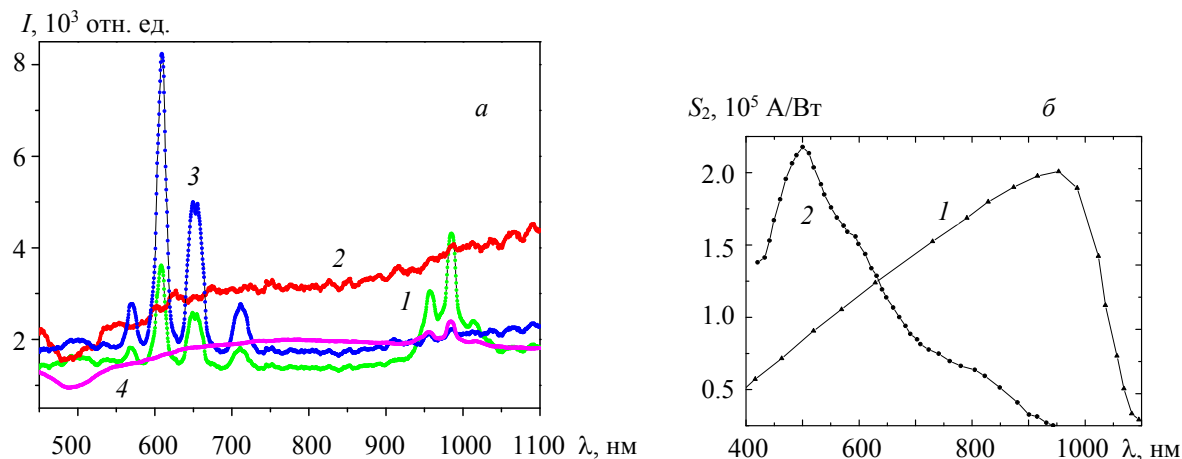


Рис. 4. Спектры ФЛ различных по составу оксоселенидов на кварце: $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{Se:3\%Sm}$ (1), $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se:1\%Pr}$ (2), $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se:3\%Sm}$ (3), $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se:3\%Tb}$ (4) (а); спектральная чувствительность ЛФД (1) и Si-ФЭУ (2) (б)

Фотоприемные устройства в сцинтилляционных датчиках должны обладать хорошей чувствительностью в диапазоне длин волн ФЛ сцинтилляторов (400—900 нм) и равномерностью чувствительности по активной площади детектора. Для оценки возможности использования оксоселенидов в детекторах УФ-излучения проведено сравнение оптических характеристик фотоприемных устройств и исследуемых пленок оксоселенидов РЗЭ ($\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se:3\%Tb}$, $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{Se:3\%Sm}$, $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se:3\%Sm}$) на кварце. Для анализа выбраны рабочие спектральные характеристики фотоприемных устройств — ЛФД и Si-ФЭУ (рис. 4, б) ОАО «ИНТЕГРАЛ» (управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ») с размерами кристалла $\sim 2 \times 2$ мм [17, 18]. Максимум спектральной чувствительности ЛФД находится в ближнем ИК-диапазоне 950—980 нм и составляет 55 А/Вт при рабочем напряжении от 200 до 250 В. Для Si-ФЭУ максимум спектральной чувствительности находится в видимом диапазоне 500—520 нм и составляет 225 000 А/Вт при рабочих напряжениях 30—35 В. Исходя из спектров ФЛ оксоселенидов РЗЭ, для использования их в качестве сцинтиллятора совместно с ЛФД подходят $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se:3\%Tb}$ и $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{Se:3\%Sm}$, а для работы совместно с Si-ФЭУ больше подходит $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se:3\%Sm}$. Однако ввиду более высокой фоточувствительности Si-ФЭУ данный фотоприемник имеет большую вероятность регистрации даже очень слабых сигналов ФЛ сцинтилляторов во всем спектральном диапазоне, чем ЛФД.

Заключение. Установлено, что новые неорганические люминофоры в виде тонких пленок с кристаллитами $\text{RE}_2\text{O}_2\text{Se:RE'}$ ($\text{RE} = \text{Gd}, \text{Y}$; $\text{RE'} = \text{Sm}, \text{Tb}$) с концентрацией 3 % легирующей примеси RE' обладают фотолюминесценцией в видимом (600—700 нм) и ИК-диапазонах (956 и 985 нм), что соответствует рабочей области спектральной чувствительности кремниевых фотодетекторов (лавинного фотодиода или кремниевого фотозлектронного умножителя). Данные материалы могут быть использованы для создания сцинтилляторов для детекторов коротковолнового излучения на основе кремниевых фотоприемников. Полученные результаты подтверждают необходимость дальнейшего изучения люминесцентных свойств тонких пленок $\text{RE}_2\text{O}_2\text{Se:RE'}$ при воздействии других видов излучений для практического применения их в качестве сцинтилляторов.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Ф20Р-256 от 04.05.2020 г.).

-
- [1] **Р. Ю. Шендрик.** Методы экспериментальной физики конденсированного состояния, Иркутск, Иркут. гос. ун-т (2013)
- [2] **P. Lecoq, A. Gekhtin, M. Korzhik.** *Inorganic Scintillators for Detector Systems*, Berlin, Springer (2017)
- [3] **И. Р. Гулаков, В. Б. Залесский, А. О. Зеневич, С. А. Сорока, А. М. Лемешевская, В. С. Цымбал, В. В. Малютина-Бронская.** Проблемы инфокоммуникаций, № 2 (10) (2019) 5—10
- [4] **И. Р. Гулаков.** Регистрация ионизирующих излучений, Минск, Вышэйшая школа (2021)
- [5] **G. Kertzscher, S. Beddar.** *Phys. Med. Biol.*, **62**, N 12 (2017) 5046—5075
- [6] **M. Nakamura, K. Chida, M. Zuguchi.** *Med. Phys.*, **41**, N 10 (2014) 101913
- [7] **K. Byrne, M. Alharbi, N. Esplen, P. Woulfe, S. OrKeeffe, M. Bazalova-Cater, M. Foley.** *IEEE Sens.*, **20**, N 9 (2020) 4704—4712
- [8] **D. S. Hussey, J. M. LaManna, E. Baltic, D. L. Jacobson.** *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A: Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.*, **866** (2017) 9—12
- [9] **M. S. Tarasenko, A. S. Kiryakov, A. A. Ryadun, N. V. Kuratieva, P. E. Plyusnin, N. G. Naumov.** *Mater. Today Commun.*, **21** (2019) 100665
- [10] **G. F. Knoll.** *Radiation Detection and Measurement*, New York, John Wiley & Sons (2010)
- [11] **М. С. Тарасенко, А. А. Рядун, Ж. К. Оразов, Т. А. Помелова, В. Б. Залесский, В. В. Малютина-Бронская, В. Е. Федоров, Н.-Ch. Wang, Н. Г. Наумов.** *Неорг. матер.*, **57**, № 8 (2021) 872—877
- [12] **M. S. Tarasenko, A. S. Kiryakov, A. A. Ryadun, N. V. Kuratieva V. V. Malyutina-Bronskaya, V. E. Fedorov, N. Ch. Wang, N. G. Naumov.** *J. Solid State Chem.*, **312** (2022) 123224
- [13] **M. S. Tarasenko, A. A. Ryadun, Zh. K. Orazov, T. A. Pomelova, V. B. Zalesski, V. V. Malyutina-Bronskaya, V. E. Fedorov, N. Ch. Wang, N. G. Naumov.** *Inorg. Mater.*, **57**, N 8 (2021) 830—834
- [14] **В. В. Осипов, А. В. Расулева, В. И. Соломонов.** *ЖТФ*, **78**, № 11 (2008) 140—142
- [15] **В. В. Осипов, А. В. Расулева, В. И. Соломонов.** *Опт. и спектр.*, **105**, № 4 (2008) 578—584
- [16] **В. И. Соломонов, В. В. Осипов, В. А. Шитов, К. Е. Лукьяшин, А. С. Бубнова.** *Опт. и спектр.*, **128**, № 1 (2020) 5—9
- [17] **В. С. Малышев, С. А. Сорока, А. М. Лемешевская, В. Б. Залесский, А. А. Ходин, В. В. Малютина-Бронская.** Материалы 7-го Белорусского космического конгресса, 24—26 октября 2017 г., Минск, ОИПИ НАН Беларуси (2017) 76—79
- [18] **С. А. Сорока, В. Б. Залесский, В. В. Малютина-Бронская, А. М. Лемешевская, В. В. Солодуха.** Материалы 8-й Международн. науч. конф. по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения, 16—17 мая 2019 г., Минск, Лаборатория интеллекта (2019) 32—34