

02

Резонансное возбуждение фотолюминесценции в кристаллогидрате уранилацетата

© В.С. Горелик^{1,2}, А.А. Лобойко^{1,2}, С.О. Нечипуренко^{1,3}

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
119991 Москва, Россия

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005 Москва, Россия

³ Московский физико-технический институт,
141707 Долгопрудный, Россия

e-mail: gorelik@sci.lebedev.ru

Поступила в редакцию 03.10.2017 г.

Предложен метод экспресс-анализа ураниловых соединений на основе резонансного волоконно-оптического возбуждения фотолюминесценции (ФЛ) ультрафиолетовым излучением лазеров или полупроводниковых светодиодов. С использованием разработанной методики получены спектры ФЛ кристаллогидрата уранилацетата $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ при экспозициях 10^{-3} s предельно малого объема вещества (10^{-9} cm³). В качестве источников возбуждающего излучения использованы полупроводниковые светодиоды с длинами волн 369, 385, 410 и 466 nm, а также импульсно-периодический азотный лазер с длиной волны генерации 337 nm. Регистрация спектров ФЛ осуществлялась малогабаритным миниспектрометром, обеспечивающим возможность анализа спектров в диапазоне 200–1000 nm.

DOI: 10.21883/OS.2018.02.45528.218-17

Введение

Интерес к соединениям урана [1] в настоящее время обусловлен их применениями в атомной энергетике и возникающими вследствие этого проблемами переработки и утилизации. Интенсивные исследования спектров этих соединений ведутся [2,3] с конца двадцатого столетия после начала прикладных работ в этой области [4]. Соединения урана представляют интерес также в связи с их особыми кристаллохимическими и физико-химическими свойствами [5,6]. Одним из таких свойств является наличие интенсивного люминесцентного свечения [7] в видимой области спектра, обусловленного электронным строением иона уранила (UO_2)⁺ [8].

В спектре электронных состояний этого иона имеется большое число энергетических переходов. Переходы находятся в ультрафиолетовой, инфракрасной и видимой областях. В монографии [9] приводятся общие сведения и анализ соединений ураниловой группы. Ранее в работах [10–17] были исследованы спектры фотолюминесценции (ФЛ) и поглощения органических и неорганических комплексов на основе уранила: силиката, перхлората, нитрата, сульфата, фторида и оксалата уранила при разных температурах. В этих работах было установлено, что спектры ФЛ ураниловых соединений при комнатной температуре обычно состоят из системы эквидистантно расположенных диффузных полос, занимающих область спектра около 450 nm. В зависимости от условий регистрации обнаруживается 4–8 полос ФЛ с расстоянием между максимумами (в шкале частот) около 860 cm^{-1} . Спектральные положения максимумов этих полос зависят от химического состава соответ-

ствующего соединения. Охлаждение кристаллических образцов до температуры кипения жидкого кислорода или азота сопровождается расщеплением спектров ФЛ большинства ураниловых соединений в полосе ФЛ с полушириной $20\text{--}40 \text{ cm}^{-1}$. В результате этого расщепления формируется структура спектров ФЛ при возбуждении различными длинами волн видимого и ультрафиолетового диапазонов [10,18]. Образовавшаяся структура индивидуальна для каждого соединения и очень чувствительна к наличию примесей.

В работах [19–23] приведен подробный анализ электронных конфигураций некоторых ураниловых соединений, а также детально описаны механизмы распределения энергии между собственными колебаниями кристалла. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с результатами теоретико-группового анализа. Все ФЛ-исследования в этих работах, как правило, проводились при значительном охлаждении ураниловых комплексов.

В работе [24] на примере хлорида уранила было установлено, что областям сильного поглощения иона уранила соответствует возбуждающее излучение с частотами 20400 (490), 21000 (476), 21500 (465), 22500 (445), 23000 (434), 23900 (418), 24400 (410), 26000 cm^{-1} (384 nm), а также с частотой, превышающей 27000 cm^{-1} (370 nm).

Уранилацетат (наряду с уранилнитратом) является одним из основных урансодержащих соединений, встречаемых в природе [25]. В работе [26] проводились исследования оптических свойств, связанных со спектрами поглощения и ФЛ уранилацетата и уранилнитрата. В этой работе удалось зарегистрировать надежные спектры ФЛ

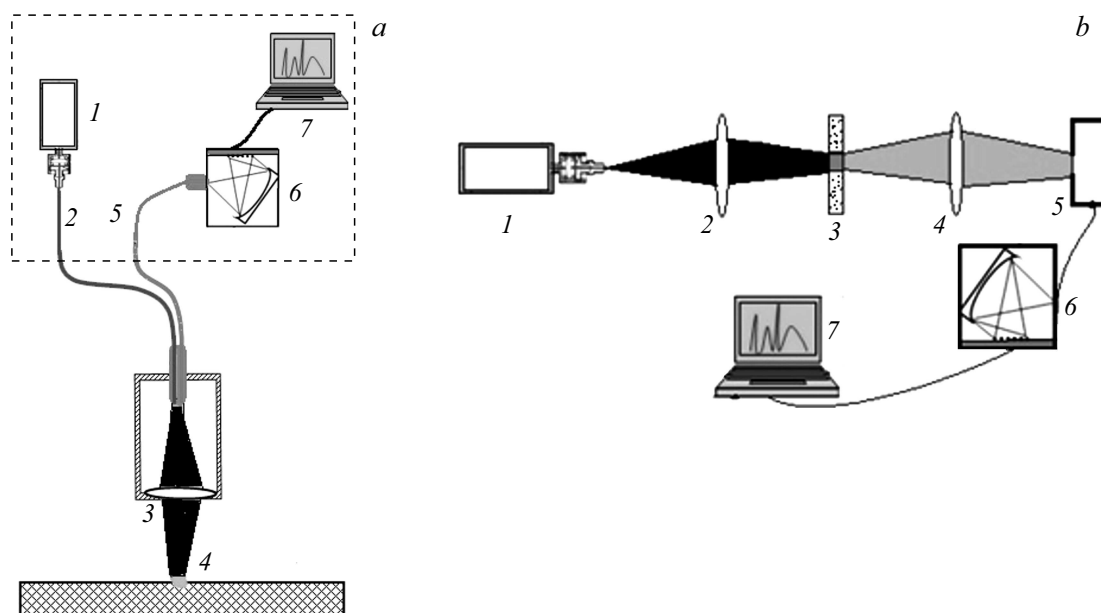


Рис. 1. Экспериментальная установка для возбуждения ФЛ в кристаллогидрате уранилацетата; *a*: схема „на отражение“, 1 — источник оптического возбуждения, 2, 5 — кварцевые волноводы, 3 — собирающая линза, 4 — кювета с исследуемым образцом, 6 — спектрометр, 7 — компьютер; *b*: схема „на пропускание“, 1 — лазер, 2, 4 — собирающие линзы, 3 — образец, 5 — фиксатор, 6 — спектрометр, 7 — компьютер.

только при низких температурах (4–78 К). Возбуждение ФЛ производилось при помощи ртутной лампы, излучающей на длине волны 365 nm. У исследуемых образцов спектр ФЛ представлял собой четыре полосы с максимумами интенсивности на длинах волн 489, 507, 534 и 559 nm, соответствующих переходам с первого возбужденного электронного уровня на колебательные подуровни ураниловой группы основного электронного состояния [27].

В работе [28] был зарегистрирован спектр ФЛ в кристаллах натрий-уранилацетата $\text{NaUO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_3$ при комнатной температуре. При этом в качестве источников возбуждающего излучения применялись полупроводниковые светодиоды и лазер с длиной волны генерации 266 nm. В этой работе было зарегистрировано излучение ФЛ с длинами волн 479, 498, 521 и 546 nm. Также было обнаружено, что при импульсно-периодическом лазерном возбуждении твердотельным лазером с длиной волны 266 nm наблюдалось перераспределение интенсивности в спектре ФЛ на полосе, соответствующей 498 nm (21000 cm^{-1}). Авторами этой работы высказано предположение о возможности лазерной генерации в ионах уранила, аналогично генерации излучения на красителях [29].

Целью данной работы являлась разработка экспресс-метода для выявления ураниловых компонент при комнатной температуре. На основе предложенной методики ставилась задача регистрации спектров ФЛ от поликристаллов кристаллогидрата уранилацетата $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и его сопоставления с извест-

ными спектрами ФЛ натрий-уранилацетата и некоторых других соединений.

Методика эксперимента

Уранилацетат существует в виде кристаллогидрата $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [30]. Поликристалл относится к орторомбической сингонии и характеризуется пространственной группой симметрии $Pnam(D_{2h}^{16})$ с параметрами решетки $Z = 4$, $a = 9.622$, $b = 14.833$ и $c = 6.808 \text{ \AA}$. Линейные группы UO_2 расположены вдоль оси D_{2h} точечной группы симметрии кристалла. Исследуемый образец представлял собой желтый порошок, помещенный в кварцевую кювету. Размер микрочастиц поликристаллов уранилацетата составлял около $100 \mu\text{m}$. Исследования спектров ФЛ проводились при комнатной температуре.

В работе использовались две экспериментальные установки, представленные на рис. 1. В схеме „на отражение“ (рис. 1, *a*) излучение по кварцевому световоду диаметром $100 \mu\text{m}$ направлялось на поверхность кристалла в направлении, близком к нормальному. ФЛ, возникающая в кристалле, попадала в другой световод [31].

Спектры ФЛ кристаллогидрата уранилацетата регистрировались при возбуждении квазимонохроматическими полупроводниковыми светодиодами с длинами волн 369 (3.36), 385 (3.24), 410 (3.02), 466 nm (2.64 eV). Спектр источников оптического возбуждения попадал в полосы сильного поглощения иона уранила [24,32]: $27000 (370)$, $26000 (384)$, $24400 (410)$ и $21500 \text{ cm}^{-1} (465 \text{ nm})$. Возбуждающее излучение вследствие сильно-

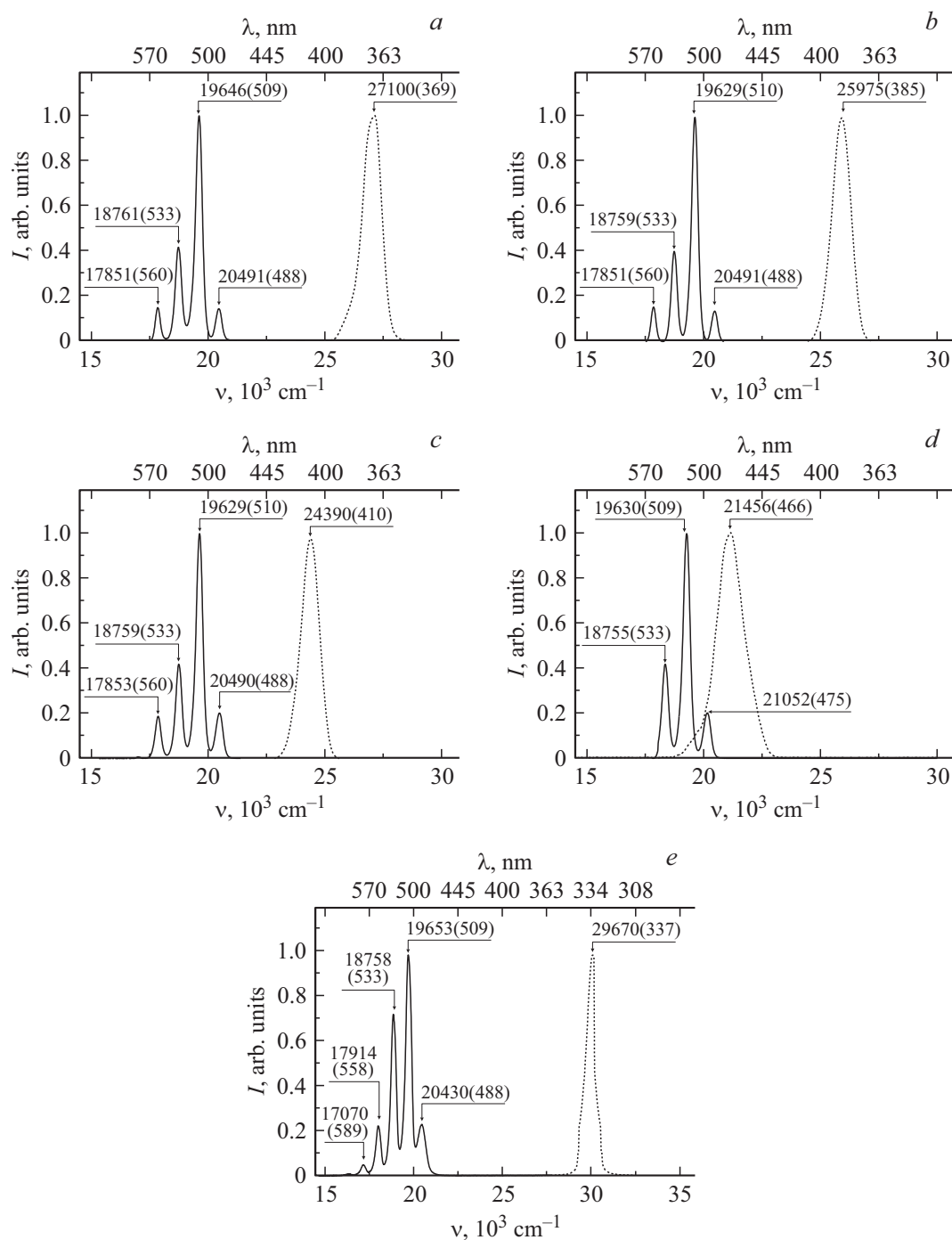


Рис. 2. Спектры ФЛ при возбуждении диодами с различными длинами волн: *a* — $\lambda = 369$ nm, *b* — 385 nm, *c* — 410 nm, *d* — 466 nm и лазером: *e* — $\lambda = 337$ nm.

го поглощения поликристаллов кристаллогидрата уранилацетата проникало на небольшую глубину образца порядка длины волны $\sim 10^{-5}$ см; при этом площадь освещаемой возбуждающим излучением поверхности образца составляла $\sim 10^{-4}$ см². Таким образом, объем люминесцирующего вещества составлял $\sim 10^{-9}$ см³.

В схеме установки „на пропускание“ (рис 1, *b*) в качестве источника оптического возбуждения использовался азотный лазер на длине волны 337 nm, работающий в

импульсно-периодическом режиме. Спектр этого источника возбуждения также попадал в область сильного поглощения уранила (> 27000 см⁻¹).

Полученные спектры ФЛ регистрировались цифровым спектрометром FSD-8, подключенным к компьютеру. Рабочий спектральный диапазон используемого спектрометра составлял 200–1000 nm при разрешении около 1 nm. Экспозиции при регистрации спектров варьировались в диапазоне 0.1–128 ms.

Таблица 1. Спектральные положения максимумов интенсивности ФЛ кристаллогидрата $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и их сопоставление с данными для $\text{NaUO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_3$

Длина волны, nm	Частоты спектральных положений максимумов интенсивности полос для $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, cm^{-1}					Частоты спектральных положений максимумов интенсивности полос для $\text{NaUO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_3$, cm^{-1}				
337	17070	17914	18758	19653	20430	—	—	—	—	—
369	—	17850	18761	19646	20491	17490	18301	19192	20099	20875
385	—	17853	18759	19629	20491	17394	18315	19192	20035	20898
410	—	17851	18759	19629	20490	—	18281	19192	20099	20875
466	—	—	18755	19630	21052	—	18301	19192	20099	20875

Результаты экспериментальных исследований

Полученные спектры ФЛ поликристаллов кристаллогидрата уранилацетата при возбуждении различными источниками оптического возбуждения приведены на рис. 2. На рис. 2, *a–d* возбуждение ФЛ осуществлялось полупроводниковыми светодиодами с длинами волн: *a* — 369 nm, *b* — 385 nm, *c* — 410 nm, *d* — 466 nm, на рис. 2, *e* — азотным лазером на длине волны 337 nm. Из представленного рисунка видно, что наблюдаемые спектры ФЛ состоят из хорошо разрешенных четырех полос (рис. 2, *a–c*) при возбуждении светодиодами и пяти полос при лазерном возбуждении (рис. 2, *e*). С уменьшением частоты возбуждающего излучения происходит изменение формы спектра ФЛ.

В табл. 1 представлены значения частот максимумов интенсивности (в cm^{-1}) полос ФЛ для кристаллогидрата уранилацетата, полученными в данной работе. В этой же таблице для сравнения приводятся данные аналогичных измерений для натрий-уранилацетата [28].

Обсуждение результатов эксперимента

Таким образом, в данной работе предложен метод резонансного экспресс-анализа для обнаружения ураниловых комплексов. В основе метода лежит резонансное возбуждение иона уранила при попадании частоты возбуждающего излучения в область сильного поглощения образца. Такое возбуждение осуществимо с использованием ультрафиолетовых светодиодов, обеспечивающих излучение в узком спектральном диапазоне. Регистрация спектров ФЛ проводилась на основе оптоволоконных методов миниспектрометром типа FSD-8 от предельно малого объема образца (10^{-9}cm^3) и при малых экспозициях $\sim 10^{-3} \text{s}$.

Полученные спектры ФЛ кристаллогидрата уранилацетата состояли из четырех хорошо разрешенных полос с максимумами интенсивности на частотах 17852, 18762, 19630 и 20490cm^{-1} . Полученные спектры согласуются с результатами, полученными ранее [26] с использованием крупногабаритной установки и ртутной лампы в качестве источника возбуждающего излучения. Поглощение

Таблица 2. Номера и разности частот максимумов интенсивности ФЛ кристаллов $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и $\text{NaUO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_3$

Кристаллогидрат уранилацетата $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$		Натрий-уранилацетат $\text{NaUO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_3$	
$\nu \pm 50, \text{cm}^{-1}$ (положение максимумов интенсивности ФЛ)	$\Delta\nu \pm 50, \text{cm}^{-1}$	$\nu \pm 50 \text{cm}^{-1}$ (положение максимумов интенсивности ФЛ)	$\Delta\nu \pm 50, \text{cm}^{-1}$
17851		18300	
	906		892
18757		19192	
	873		907
19630		20099	
	861		776
20491		20875	

и испускание света в ионах уранила иллюстрирует диаграмма энергетических уровней [33] кристаллогидрата уранилацетата, приведенная на рис. 3. На этой диаграмме основное и возбужденное электронные состояния обозначены S_0 и S_1 . Каждый из этих энергетических уровней состоит из набора колебательно-вращательных подуровней, обозначенных 0, 1, 2 и т.д. Поглощение иона уранила (UO_2)⁺ соответствует переходам с самого нижнего основного электронного состояния S_0 на возбужденное S_1 , а также на его подуровни.

Наблюдаемые спектры ФЛ соответствуют [27] излучательным переходам с энергетического уровня S_1 иона уранила в основное энергетическое состояние S_0 или на его колебательные подуровни основного состояния. Таким образом, наибольшая частота излучательного перехода $\nu_1 = 20490 \text{cm}^{-1}$ соответствует резонансной частоте перехода электрона на основной электронный уровень. Переходы с частотами $\nu_2 = 19630$, $\nu_3 = 18762$, $\nu_4 = 17852 \text{cm}^{-1}$ соответствуют переходам с возбужденного электронного состояния в основное — на первый, второй и третий колебательные подуровни соответственно. В табл. 2 приведены частоты максимумов

Таблица 3. Сопоставление частот максимумов интенсивности ФЛ комплексов на основе уранила в cm^{-1}

Соединение	ν_1, cm^{-1} (1 пик)	ν_2, cm^{-1} (2 пик)	ν_3, cm^{-1} (3 пик)	ν_4, cm^{-1} (4 пик)	ν_5, cm^{-1} (5 пик)	ν_6, cm^{-1} (6 пик)	ν_7, cm^{-1} (7 пик)
Силикат уранила $\text{K}(\text{UO}_2) \cdot (\text{SiO}_3\text{OH}) \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ [17]	19787	18685	17921	17259	–	–	–
Фторид UO_2F_2 [11]	20234	19366	18500	17490	16640	–	–
Чистый уранил UO_2 [13]	20338	19459	18574	17746	16895	–	–
Перхлорат $\text{UO}_2(\text{ClO}_4) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [15]	20408	19342	18691	–	–	–	–
Кристаллогидрат уранилацетата $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [настоящая работа]	20491	19630	18757	17851	–	–	–
Нитрат $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ [12]	20703	19801	19011	18083	17152	–	–
Натрий-уранилацетат $\text{NaUO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_3$ [28]	20875	20099	19192	18300	–	–	–
Сульфат $\text{K}_2(\text{UO}_2) \cdot (\text{SO}_4)_2$ [10]	20986	20325	19493	18657	17838	17004	16155

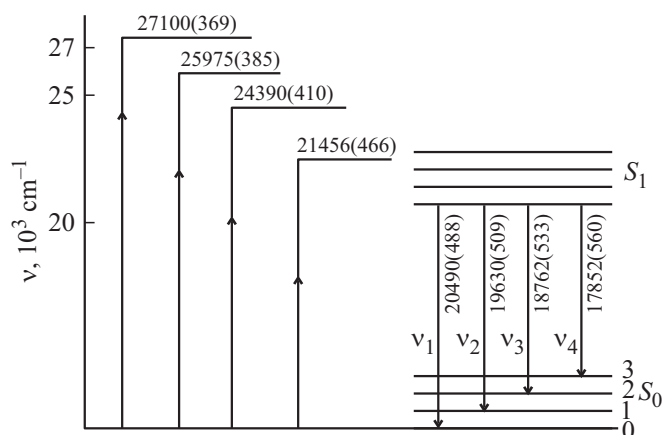
интенсивности ФЛ для кристаллогидрата уранилацетата и натрий-уранилацетата. По данным этой таблицы можно сделать вывод, что наблюдаемые полосы ФЛ являются эквидистантными (с точностью до ошибки измерений). Видно, что эти максимумы на шкале частот (а следовательно, и колебательные уровни энергии) отстоят друг от друга примерно на $870 \pm 50 \text{ cm}^{-1}$. Эта частота соответствует симметричным валентным колебаниям иона уранила [27]. Значения соответствующих частот положений максимумов интенсивности ФЛ для $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и $\text{NaUO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_3$ отличаются на величину 400 cm^{-1} . Эти отличия связаны с положением первого возбужденного электронного уровня. Резонансная частота перехода для кристаллогидрата уранилацетата (20491 cm^{-1}) на 384 cm^{-1} меньше чем у натрий-уранилацетата (20875 cm^{-1}). Таким образом, положение первого электронного возбужденного уровня у натрий-уранилацетата находится выше, чем у кристаллогидрата уранилацетата на величину 384 cm^{-1} . Эти уровни соответствуют возбуждению иона уранила в конденсированных средах, а также зависят от лигандов, входящих в его среду.

В табл. 3 приводятся значения частот (в cm^{-1}) максимумов ФЛ для некоторых упомянутых во введении комплексов на основе уранила. Из этой таблицы видно, что можно однозначно детектировать кристаллогидрат уранилацетата по ФЛ-свойствам при комнатной температуре. С учетом малых габаритов созданной экспериментальной установки может быть изготовлен портативный экспресс-анализатор для исследования окружающей среды на наличие ураниловых компонент. Резонансное возбуждение иона $(\text{UO}_2)^+$ и возбуждение источниками спектральной области, соответствующей сильному электронному поглощению иона уранила, обеспечивают эффективную люминесценцию кристалла. При этом полоса ФЛ с максимумом на частоте 19630 cm^{-1} является самой интенсивной. Эта полоса представляет собой узкий пик. Ее ширина не превышает 20 nm . Проявление узкого интенсивного пика свидетельствуют о высокой доле

вероятности испускания фотона с частотой 19630 cm^{-1} при ФЛ.

Следует отметить, что в работе [28] при возбуждении ФЛ натрий-уранилацетата под действием импульсно-периодического лазерного возбуждения твердотельным лазером с длиной волны 266 nm при накачке по четырехуровневой схеме наблюдалось явление суперлюминесценции. Суперлюминесценция проявлялась в усилении интенсивности ФЛ в полосе, соответствующей 498 nm (20100 cm^{-1}).

Наблюдение суперлюминесценции в кристаллах натрий-уранилацетата свидетельствует о возможности лазерной генерации и в кристаллогидрате уранилацетата $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. В отличие от известных лазеров на красителях [34] источники, использующие эффект суперлюминесценции в ураниловых соединениях, характеризуются большим коэффициентом усиления. Усиление интенсивности в кристаллогидрате уранилацетата должно проявляться на частоте 19630 cm^{-1} (вследствие отличий положений первых возбужденных уровней на величину 385 cm^{-1}). При этом в качестве источника накачки предлагается использовать твердотельный лазер с длиной волны 266 nm .

**Рис. 3.** Диаграмма энергетических уровней кристалла $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о возможности проведения экспресс-анализа небольших количеств кристаллогидрата уранилацетата в окружающей среде методом волоконно-оптического возбуждения спектров ФЛ ультрафиолетовыми и синими полупроводниковыми светодиодами. Установлено, что в спектре ФЛ присутствуют четыре полосы с положениями максимумов интенсивности на частотах 17851, 18757, 19630 и 20491 cm^{-1} . Наблюдаемые спектры ФЛ, полученные по схеме „на отражение“, соответствуют излучательным переходам с возбужденных энергетических электронных уровней иона уранила в основное энергетическое состояние и на колебательные подуровни, расположенные эквидистантно (860 cm^{-1}). Выявлена аналогичная спектральная картина в схеме „на пропускание“ при импульсно-периодическом лазерном возбуждении. Установлена близость спектров ФЛ для кристаллогидрата уранилацетата и натрий-уранилацетата. Вибронная структура в этих спектрах обусловлена проявлением симметричных колебаний иона уранила (A_1 -типа). Наблюдаемые различия связаны с различным положением первого электронного возбужденного уровня в обсуждаемых соединениях. В натрий-уранилацетате это положение находится выше, чем у кристаллогидрата уранилацетата, на 385 cm^{-1} . Установлена возможность лазерной генерации в кристаллах $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, аналогичной генерации на красителях при накачке по четырехуровневой схеме.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16-52-00026 (БРФФИ-РФФИ Ф16Р-063).

Список литературы

- [1] Audi G., Bersillon O., Blachot J., Wapstra A. // Nucl. Phys. A. 2003. V. 729. P. 3.
- [2] Bostick B.C., Fendorf S., Barnett M.O., Jardine P.M., Brooks S.C. // Soil Sci. Soc. Am. 2002. V. 66. P. 99.
- [3] Barraclough C.G., Cockman R.W., O'Donnell T.A. // Inorg. Nucl. Chem. Lett. 1981. V. 17. P. 83.
- [4] Komura K., Yamamoto M., Ueno K. // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A. 1990. V. 295. P. 461.
- [5] Gaziev S.A., Gorshkov N.G., Mashirov L.G., Suglov D.N. // Inorg. Chem. Acta. 1987. V. 139. P. 345.
- [6] Denning R.G., Snellgrove T.P., Woodwark D.R. // Theor. Mol. Phys. 1979. V. 37. P. 1109.
- [7] Meinrath G. // J. Radioanal. Nucl. Chem. 1997. V. 224. P. 119.
- [8] Liu G. // J. Phys. Chem. A. 2011. V. 115. P. 12419.
- [9] Rabinowitch E., Belford R.L. Spectroscopy and Photochemistry of Uranyl Compounds. N.Y.: The Macmillan Co. 1964. 375 p.
- [10] Nichols E.L., Howes H.L. Fluorescence of the Uranyl Salts. Carnegie Inst.: Wash. Pub., 1919. 298 p.
- [11] Dieke G.H., Duncan A.B.F. Spectroscopic Properties of Uranium Compounds. N.Y.: McGraw-Hill Book Co., 1949. 290 p.
- [12] Sevchenko A.N., Vdovenko V.M., Kovaleva T.V. // Zhur. Eksptl. Teoret. Fiz. 1951. V. 21. P. 204.
- [13] Wang Z., Zachara J.M., Yantasee W., Gassman P.L., Liu Ch., Joly A. // Environ. Sci. Technol. 2004. V. 38. P. 5591.
- [14] Flint C.D., Tanner P.A. // J. Chem. Soc. 1978. V. 74. P. 2210.
- [15] Pant D.D., Khandelwal D.P. // Sci. Industr. Res. B. 1959. V. 18. P. 126.
- [16] Mizuoka K., Tsushima S., Hasegawa M., Hoshi T., Ikeda Y. // Inorg. Chem. 2005. V. 44. P. 6211.
- [17] Wang Z., Zachara J.M., Gassman P.L., Liu Ch., Qafoku O., Yantasee W., Catalano J.G. // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2005. V. 69. P. 1391.
- [18] Leung A., Hayashibara L., Spadaro J. // J. Phys. Chem. Solids. 1999. V. 60. P. 299.
- [19] Denning R.G. // J. Phys. Chem. A. 2007. V. 111. P. 4125.
- [20] Denning R.G., Snellgrove T.R., Woodwark D.R. // Molec. Physics. 1975. V. 30. P. 1819.
- [21] Flint C.D., Sharma P. // Molec. Chem. Phys. 1983. V. 79. P. 317.
- [22] Flint C.D., Tanner P.A. // Molec. Chem. Phys. 1982. V. 78. P. 103.
- [23] Denning R.G., Morrison I.D. // Chem. Phys. Lett. 1991. V. 180. P. 101.
- [24] Christiane Görrler-Walrand, Sandy De Houwer // Phys. Chem. 2004. V. 6. P. 3292.
- [25] Lide D.R. Handbook of Chemistry and Physics. Boca Raton. FL: CRC Press, 1998. 566 p.
- [26] Volod'ko L.V., Turetskaya E.A. // J. Appl. Spectr. 1965. V. 3. P. 180.
- [27] Burrows H.D., Kemp T.J. // Chem. Soc. Rev. 1974. V. 3. P. 139.
- [28] Горелик В.С., Коршунов В.М., Войнов Ю.П. // Опт. и спектр. 2016. Т. 121. № 6. С. 881.
- [29] Бабенко В.А., Малышев В.И., Сычев А.А., Шибанов А.Н. // Квант. электрон. 1975. Т. 2. № 9. С. 1923.
- [30] Howatson J., Grev D.M., Morosin B. // J. Inorg. Nucl. Chem. 1975. P. 1933.
- [31] Горелик В.С., Лутвинова А.О., Умаров М.Ф. // Кратк. сообщ. по физ. Физ. инст. им. П.Н. Лебедева РАН. 2014. № 11. С. 3.
- [32] Xiaoping Sun, Kolling D.R.J., Hajer Mazagri // Inorg. Chim. Acta. 2015. V. 435. P. 117.
- [33] Jablonski A. // Nature. 1933. V. 131. P. 839.
- [34] Liu G.K., Zhuang H.Z., Beitz J.V. // Phys. Solid State. 2002. V. 44. P. 1433.