

## Особенности диссипации электронного возбуждения ураниловых соединений

В. В. СЫТЬКО

Уран – типичный представитель ряда актинидов. Его содержание в земной коре около 0.003 %, а в водах мирового океана около  $1.5 \cdot 10^{-6}$  г/л. В природе уран существует в виде кислородных соединений, наиболее распространенной формой которых являются комплексные соединения уранила (КСУ), характеризующиеся наличием линейного иона уранила  $O=U=O$  ( $UO_2^{2+}$ ), сохраняющего индивидуальность при большинстве химических реакций. Соединения урана представляют интерес как с точки зрения теории комплексных соединений, так и из соображений их практического использования (получение ядерного горючего и утилизация отходов, прямое преобразование солнечной энергии в электрическую, аспекты биологического действия, создание новых перспективных материалов и так далее).

Соединения уранила давно привлекают внимание ученых. Начало систематических спектроскопических исследований относится к 1833 г. и связано с обнаружением Брюстером интенсивной люминесценции канарского стекла. Анализ особенностей взаимодействия света с солями уранила привел к установлению ряда фундаментальных закономерностей, в частности, правила, определяющего соотношение спектральных положений максимумов полос поглощения и люминесценции (правила Г. Стокса), экспоненциального характера затухания молекулярной люминесценции (Е. Беккерель), взаимосвязи между скоростями фотохимических реакций и величиной поглощения (В. Хенри, М. Ландау) и ряда других. При исследовании люминесценции КСУ впервые было экспериментально доказано наличие миграции энергии электронного возбуждения в молекулярных системах, протекающей по индуктивно-резонансному механизму (С.И. Вавилов, А.Н. Севченко).

Однако, несмотря на то, что указанные закономерности люминесценции были выявлены при исследовании КСУ, процессы преобразования энергии их электронного возбуждения обладают рядом особенностей, отличающей КСУ от многих люминесцирующих веществ, что обусловлено спецификой электронного строения уранилового комплекса. Как было нами показано (см. [1-4] и цитируемую там литературу), прежде всего это связано с тем, что в формировании оптических свойств КСУ принимают участие электронные переходы с трех молекулярных орбиталей (МО) валентной зоны, имеющие характер переходов с переносом заряда. Для переходов с верхней заполненной МО преимущественно лигандного характера это перенос электрона к урану от экваториальных лигандов (Lig) комплекса. Разрешенные переходы с данной МО на четные разрыхляющие орбитали, в образовании которых принимают участие как  $U_{6p}$ -,  $U_{6d}$ - атомные орбитали (АО), так и орбитали лигандов, могут усиливать роль кооперативных процессов. Возбуждение электронов с более глубоких валентных МО приводит к делокализации электронного возбуждения в рамках всего уранилового комплекса, приводя к понижению степени ковалентности связи  $O=U=O$  в комплексе и существенно повышая роль лигандов в диссипационных процессах. Таким образом, при возбуждении, затрагивающем экранированные связывающие МО комплекса, существенно возрастает вероятность безызлучательных переходов (БП) и открываются новые диссипационные каналы, приводящие к спектральной зависимости квантового выхода люминесценции КСУ. Очевидно, что она обусловлена оптическими процессами, происходящими в ураниловом комплексе как единой многоэлектронной системе. Причем для всех КСУ, независимо от их состава и строения, наблюдается постоянство квантового выхода люминесценции в области запрещенных переходов и его падение при возбуждении в УФ и ВУФ диапазонах.

Как следует из дальнейшего рассмотрения, соотношение долей ковалентной и ионной составляющих связей  $O=U=O$  и  $U-Lig$  играет существенную роль в преобразовании энергии электронного возбуждения КСУ. О степени ковалентности данных связей можно судить, в частности, по значению частот валентных колебаний  $\nu(O=U=O)$  и межатомным расстояниям  $R(U=O)$  и  $R(U-Lig)$ . Нами показано [5-7], что в кислородсодержащих соединениях  $U(VI)$  взаимное влияние лигандов в комплексе  $U(VI)$  обуславливает различные парциальные вклады по крайней мере 5f-, 6d- и 6p- АО урана и p- АО атомов его первой координационной сферы в химическое связывание. При этом степень локализации электронного облака в комплексе зависит от электроотрицательности лигандов, и с увеличением их числа имеет место делокализация валентных электронов урана в область более электроотрицательных лигандов. Соответствующая перестройка валентной конфигурации уранила приводит к изменению энергий связей в комплексе (при существенно ковалентном характере связей  $U-Lig$  их энергия тем меньше, чем больше число лигандов в комплексе). Это приводит к антибатному изменению энергий связи и сродства к электрону. Принятие в этом смысле концепции "первичности" связей  $O=U=O$  (преимущественно ковалентных) и "вторичности" связей  $U-Lig$  (с большей долей ионного вклада) позволяет, в частности, в определенной степени упростить описание процессов преобразования энергии электронного возбуждения в КСУ.

Другим важным аспектом рассматриваемой проблемы являются процессы температурной зависимости диссипационных процессов в КСУ. Изучение температурной эволюции электронных спектров дает ценную информацию не только о характере диссипационных процессов, но и о природе активных центров, характере их внутри- и межцентрового взаимодействия и взаимодействии с матрицей. С этой целью нами исследовано температурное тушение люминесценции, уширение и сдвиг линий электронных переходов КСУ с различной структурой в диапазоне 77÷500 К [8, 9], а также температурная зависимость параметров бесфононных линий (БФЛ) кристаллов  $M_2UO_2F_3$  ( $M - K, Rb$ ) в диапазоне 4.2÷40 К [10-12].

Относительно слабое межмолекулярное взаимодействие в кристаллах и замороженных растворах КСУ обуславливает тот факт, что ураниловый комплекс в них удовлетворяет модели примесного центра. В то же время температурная зависимость кинетики люминесценции КСУ соответствует молекулярной модели и может быть описана формулой Мотта:

$$1/\tau(T) = 1/\tau(0) + \sum_i C_i \exp \frac{E_i}{kT} \quad (1)$$

Здесь  $1/\tau(0)$  соответствует скорости излучательных и не зависящих от температуры безызлучательных переходов,  $E_i$  – энергии активации БП, а коэффициенты  $C_i$  определяются эффективностью участия в процессе того либо иного диссипационного механизма.

Более чем для половины исследованных КСУ зависимость скорости затухания люминесценции от температуры можно представить биекспонентой с двумя энергиями активации БП  $E_1$  и  $E_2$ , причем моно- либо биекспоненциальность данной зависимости не определяется ни химическим составом кристалла, ни его структурой и строением. Однако у всех КСУ имеется одна общая закономерность – более высокие по значению энергии активации БП ( $E_1/h \approx 1900 \div 5500 \text{ см}^{-1}$ ) связаны с взаимодействиями, приводящими к эффектам типа преддиссоциации, а низкие ( $E_2/h \approx 1000 \div 1350 \text{ см}^{-1}$ ) обусловлены валентно-деформационными взаимодействиями в ураниловом комплексе, приводящими к понижению его симметрии. Увеличение степени ковалентности связи  $U-Lig$  усиливает роль лигандов в диссипации энергии. В то же время рост степени перекрывания электронных оболочек координирующего центра и лигандов приводит к росту квантовой эффективности миграции энергии электронного возбуждения по подрешетке уранила.

Если рассматривать диссипационные процессы, связанные с возбуждением электронов с экранированных заполненных МО как аналоги БП с энергиями активации типа  $E_3$  ( $E_3/h > 30000 \text{ см}^{-1}$ ), то с учетом всего вышесказанного можно предложить общую эксиплексную модель процессов преобразования энергии электронного возбуждения в ураниловом

комплексе, удовлетворяющую схеме, показанной на рис. 1. В соответствии с данной схемой ион  $UO_2^{2+}$  может рассматриваться как активный в матрице основного вещества, а анализ процессов преобразования энергии электронного возбуждения в КСУ можно проводить в модели эксиплекса  $*[(UO_2^{2+})(Lig_n)]$ , условно полагая, что излучательные переходы реализуются собственно в ионе  $UO_2^{2+}$ , в то время как диссипационные процессы происходят в подсистеме лигандов.

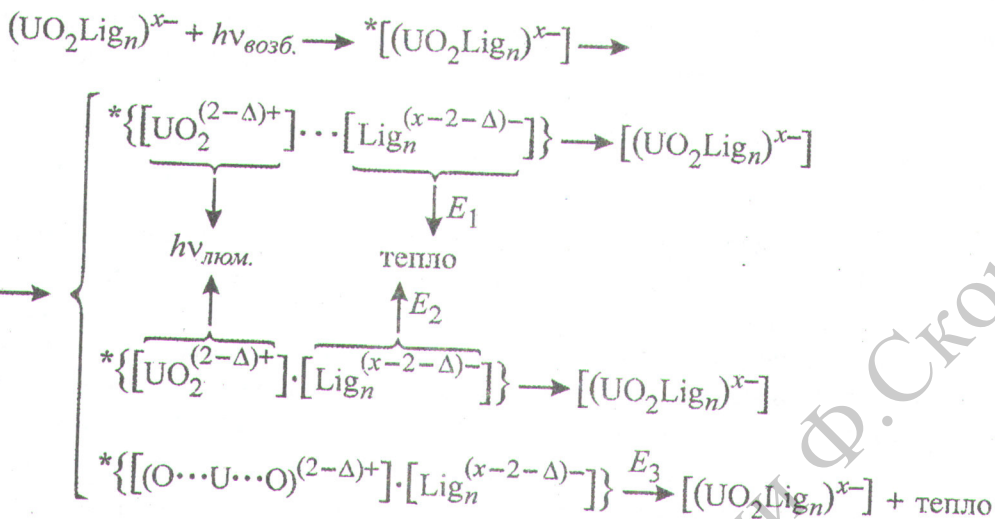


Рис. 1. Эксиплексная модель преобразования электронного возбуждения КСУ

Более детальную информацию о характере диссипационных процессов дает анализ электронных спектров КСУ при температурах, близких к температуре жидкого гелия. Такого рода исследования выполнены нами на примере кристаллов пентафторуранилатов  $K_3UO_2F_5$  и  $Rb_3UO_2F_5$  в диапазоне 4.2÷40 К. В рассматриваемом случае, когда люминесцентные свойства КСУ описываются в рамках модели примесного центра, а изменение колебательной энергии связано с изменением силовых постоянных, наблюдаемые закономерности позволяют провести описание термозависимости спектров с точки зрения конфигурационного взаимодействия (см., напр., [13-15]).

В модели конфигурационных координат контур БФЛ определяется конфигурационными кривыми комбинирующих состояний, фононным спектром кристалла и является функцией температуры:

$$\begin{aligned}
 I(h\nu)_{ij} &= |V_{ij}|^2 \int \rho_i(T) \cdot \delta(E_i(Q) - E_j(Q) - h\nu) \cdot dQ, \\
 \rho_i(T) &= \exp\left(-\frac{E_i(Q)}{kT^*}\right) \cdot \left[ \int \exp\left(-\frac{E_i(Q)}{kT^*}\right) \cdot dQ \right]^{-1}, \quad T^* = \frac{h\nu_{F,i}}{2k} \cdot \coth\left(-\frac{h\nu_{F,i}}{2kT}\right),
 \end{aligned} \quad (2)$$

где  $Q$  – конфигурационная координата,  $i$  и  $j$  – индексы начального и конечного состояний,  $|V_{ij}|$  – матричный элемент взаимодействия,  $\rho_i(T)$  – температурное распределение заселенности состояния осцилляторов  $\nu_F$  – “эффективная” фононная частота. При линейном электрон-фононном взаимодействии силовые постоянные основного ( $\omega$ ) и возбужденного ( $\omega'$ ) состояний равны, а контур БФЛ описывается гауссовым распределением вида

$$I(h\nu)_{ij} = \frac{|V_{ij}|^2}{\sqrt{2\pi\omega^2 q^2 kT^*}} \cdot \exp\left[-\frac{(h\nu - E_{ij})^2}{2\omega^2 q^2 kT^*}\right] \quad (3)$$

с полушириной

$$\Gamma(T) = \sqrt{4\omega^2 q^2 h\nu_{F,i} \cdot \ln 2 \cdot \coth\left(\frac{h\nu_{F,i}}{2kT}\right)} = \sqrt{\alpha \cdot \coth\left(\frac{\theta'}{T}\right)}, \quad (4)$$

где  $E_{ij}$  соответствует  $E_{\text{погл.}}$  или  $E_{\text{люм.}}$ ,  $q$  – сдвиг равновесных конфигурационных координат основного и возбужденного состояний.

Однако для кристаллов КСУ характерно уменьшение значений частот колебаний  $\nu_s(\text{UO}_2^{2+})$  в первом возбужденном состоянии по сравнению с основным на 14÷17%. Это свидетельствует об увеличении межатомного расстояния  $U=O$  в группе уранила в возбужденном состоянии и, соответственно, указывает на уменьшение силовой постоянной взаимодействия  $\varpi'(U=O)$  в комплексе. В данном случае ( $\varpi \neq \varpi'$ ) контур БФЛ претерпевает несимметричное искажение и может быть аппроксимирован функцией логнормального распределения

$$I^*(\nu) = I_0 \exp \left\{ -\frac{\ln 2}{\beta^2} \cdot \left[ \ln \left( 1 + 2\beta \frac{\nu - \nu_0}{\sigma} \right) \right]^2 \right\}, \quad \Gamma = \sigma \frac{\sinh \beta}{\beta}, \quad \frac{\Gamma_{\text{люм.}}}{\Gamma_{\text{погл.}}} = \left( \frac{\varpi'}{\varpi} \right)^3, \quad (5)$$

где  $\beta$  и  $\sigma$  – эмпирические параметры, определяемые свойствами кристалла. При этом температурное уширение  $\Gamma = \Gamma(T)$  подчиняется зависимости (4). Для рассматриваемых кристаллов  $\text{K}_3\text{UO}_2\text{F}_5$  и  $\text{Rb}_3\text{UO}_2\text{F}_5$  отношение  $\varpi/\varpi'$  в диапазоне 4.2÷40 К практически постоянно. Отсюда следует, что температурное уширение БФЛ преимущественно связано с изменением заселенности начальных состояний осцилляторов. В то же время сдвиг максимумов БФЛ в спектрах поглощения практически не наблюдается, а в спектрах люминесценции не подчиняется зависимости  $\Delta\nu(T) \cong \beta T^4$ , предсказываемой в модели конфигурационного взаимодействия. Это характерно для всех КСУ и обусловлено запрещенным характером нижних электронных переходов, когда спектральное положение БФЛ определяется вкладами только членов нелинейного электрон-фононного взаимодействия. С этим связан и тот факт, что температурный сдвиг БФЛ в спектрах поглощения практически отсутствует.

Указанные особенности определяют специфику диссипационных процессов КСУ.

Скорость  $w = 1/\tau$  и квантовый выход  $\eta$  люминесценции связаны со скоростью дезактивации возбужденного состояния  $w_0 = 1/\tau_0$  и скоростью БП  $d$  соотношениями

$$w = w_0 + d = w_0 / \eta, \quad \eta = I_{\text{люм.}} / I_{\text{погл.}} = \tau_0 / \tau. \quad (6)$$

Совпадающее изменение интенсивности БФЛ в спектрах поглощения и люминесценции и постоянство времени жизни люминесценции исследуемых КСУ в области 4.2÷40 К свидетельствует о независимости квантового выхода люминесценции от температуры. Таким образом, температурная активация БП должна рассматриваться здесь с позиций зависимости от температуры сил осцилляторов БФЛ в спектрах поглощения и люминесценции.

Сила осциллятора  $f$  БФЛ определяется величиной перекрытия волновых функций комбинирующих электрон-фононных состояний и температурным распределением заселенности колебательных подуровней. При отсутствии локальных колебаний и термодинамическом равновесии электрон-фононной системы в момент начала перехода (рис. 2А)

$$f_0(T) = C |V|^2 \cdot \exp \left( -\mathfrak{R}_0 \cdot \coth \left[ \frac{h\nu_F}{2kT} \right] \right), \quad (7)$$

где  $C$  – постоянная, а фактор Хуанга–Риса (стоксовы потери)  $\mathfrak{R}_0$  (рис. 1А)

$$\mathfrak{R}_0 = \frac{E_{\text{погл.}} - E_{\text{люм.}}}{2h\nu_F} = \frac{P_S}{h\nu_F}. \quad (8)$$

(Величина  $P_S = \varpi q^2/2$  называется энергией стоксовых потерь)

Ураниловые комплексы, рассматриваемые как активные центры в кристаллической матрице, обладают локальными колебаниями  $\nu_L$ , наиболее значимым из которых является симметричное валентное колебание  $\nu_s(O=U=O)$ . В данном случае структура спектра активно-го центра меняется, а стоксовы потери приобретают несколько иной смысл (рис. 2Б). В электронно-колебательных спектрах БФЛ, соответствующая чисто электронному переходу  $\nu_0$ , повторяется с частотой  $\nu_L$ , причем в силу принципа подобия форме БФЛ  $\nu_0$  соответствуют

формы линий ее колебательных повторений с  $n$  квантами  $\nu_L$ . Распределение сил осцилляторов (интегральных интенсивностей  $I_n$ ) соответствующих вибронных переходов пропорционально квадратам интегралов Франка-Кондона для локального осциллятора при заданной температуре:

$$f_n / f_0 = I_n / I_0 = (p_L)^n / n! \quad (9)$$

С другой стороны, значения  $f_n$  БФЛ могут быть представлены в виде произведения

$$f_n(T) = G_n(\nu_L, T) \cdot f_0(T), \quad (10)$$

где  $G_n(\nu_L, T)$  – весовой коэффициент  $n$ -го повторения линии 0-0 перехода с частотой  $\nu_L$  является функцией температуры, модулированной в такт функции Бесселя первого рода  $n$ -го порядка.

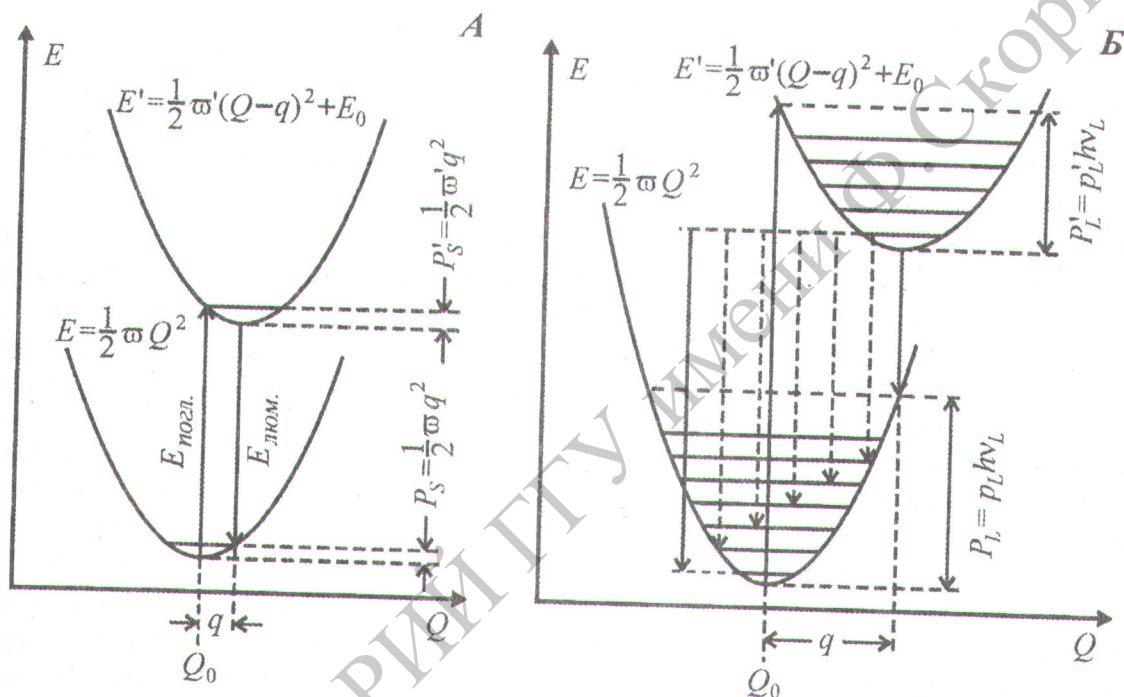


Рис. 2. Конфигурационные координаты активного центра в кристалле в отсутствие (А) и при наличии (Б) локального колебания  $\nu_L$

Нами показано [11], что когда энергия локального колебания  $h\nu_L$  существенно больше энергии  $kT$  системы в равновесном состоянии, коэффициент  $G_n(\nu_L, T)$  может быть аппроксимирован экспоненциальной функцией от параметра Стокса  $p_n$ . Тогда суммарная по спектру интегральная интенсивность вибронных переходов

$$I_\Sigma = I(\nu_0) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{p_{\nu_s}^n}{n!} = I(\nu_0) \cdot \exp(p_{\nu_s}) \quad (11)$$

может быть представлена как функция температуры в виде

$$I_\Sigma(T) = I_\Sigma(0) \cdot \exp(-\alpha \cdot p_{\nu_s}(T)) \cdot \exp\left(-\mathfrak{R}_0 \cdot \coth\left(\frac{h\nu_F}{2kT}\right)\right), \quad (12)$$

где коэффициент  $\alpha$  определяется эффективным вкладом рассматриваемого локального колебания (в частности,  $\nu_s$ ) из совокупности возможных для данного центра.

Таким образом, форма БФЛ КСУ определяется величиной Стоксова сдвига, их уширение – температурным распределением заселенности вибронных состояний, а распределение интенсивностей – частотами и формами локальных колебаний. Кроме того, с изменением

температуры изменяется распределение молекулярного ансамбля по спектру неоднородного уширения. Это обуславливает еще одну особенность преобразования энергии электронного возбуждения, связанную с миграцией возбуждения по активным центрам, что совокупности и определяет соотношение скоростей излучательных и безизлучательных переходов.

Природа миграционных процессов в кристаллах и замороженных растворах КСУ исследовалась нами при резонансном селективном лазерном возбуждении в рамках неоднородно уширенного контура БФЛ при 4.2+40 К [16-18]. Эти исследования показали, что наиболее вероятным механизмом такой миграции энергии в рамках неоднородно уширенной полосы люминесценции кристаллов КСУ является резонансный перенос энергии с участием рамановского рассеяния фононов и связан с взаимодействием нижних возбужденных энергетических уровней уранилового комплекса. При этом происходит релаксация фазовой памяти системы, уширение электронного спектра и соответственно компенсируется расстройка резонанса энергетических уровней взаимодействующих центров. Вероятность такой миграции

$$w_R = a^2 \frac{|V|^2}{\varepsilon^2} \cdot (kT)^{-7} \cdot \int_0^{\Theta/T} \frac{x^6}{(e^x - 1)(1 - e^{-x})} dx, \quad (13)$$

где  $a$  – постоянная, определяемая свойствами среды и величиной электрон-фононного взаимодействия,  $\Theta$  – температура Дебая,  $|V|$  – матричный элемент донорно-акцепторного взаимодействия,  $\nu_F$  – фононная частота,  $x = h\nu_F / (kT)$ . Кроме того, взаимодействие нижних возбужденных электронных уровней уранилового комплекса с достаточно малым энергетическим зазором приводит к нарушению адиабатичности системы, проявляющейся при температурах, близких к температуре жидкого гелия. Это позволяет (по крайней мере, частично) объяснить различия в температурной зависимости параметров электронных переходов при температурах ниже и выше эффективной дебаевской температуры.

В замороженных растворах ураниловых солей нет дальнего порядка. Здесь миграционные процессы развиваются в стохастической системе активных центров с различными равновесными расстояниями комбинирующих электронных состояний при наличии спектрально неселективной миграции энергии электронного возбуждения. При отсутствии дальнего порядка резонанс энергетических уровней донорно-акцепторной системы обеспечивается участием минимальных локальных колебательных мод – деформационных колебаний сольватированного уранилового комплекса, а температурные эволюции спектра определяются главным образом линейным вибронным взаимодействием.

Еще один интересный аспект преобразования энергии возбуждения ураниловых комплексов касается материалов, содержащих ионы  $UO_2^{2+}$  и трехвалентных редкоземельных элементов  $Ln^{3+}$ . Обобщение результатов исследований в этом направлении дано в работах [2, 3, 19, 20]. Там, в частности, показано, что наличие сопряженных связей между донором и акцептором посредством лигандов обуславливает активное участие последних в передаче энергии от  $UO_2^{2+}$  к  $Ln^{3+}$  и определяет обменный механизм взаимодействия между ними. Оптимальные условия переноса энергии реализуются в наноструктурах типа уранил-лантанидных кластеров с ослабленным  $\pi$ -сопряжением, в котором акцепторное окружение “блокирует” донор (и наоборот), препятствуя миграции энергии по однотипным активным ионам.

Наконец, следует упомянуть о перспективах исследований в области фотоники соединений уранила. Они связаны с разработкой новых материалов и аналитических приложений. Это касается активных сред и преобразователей для оптоэлектронных и квантовых систем, лазерных систем с ядерной накачкой, датчиков ионизирующей радиации и полей электромагнитного излучения, люминесцентных зондов, высокочувствительных методов их обнаружения в природных объектах (минералах, почве, рассолах, растениях и т.д.) и так далее.

**Abstract.** The author presents a review of the works on the research of the basic mechanisms of transformation of the energy of the electronic drive in the complex combinations of uranyl and materials on their basis. The author shows a role of the ligand sublattice of the system in the processes

of migration and transformation of the energy of drive; the author establishes that the interaction of the bottom driven electronic conditions of the complex results in infringement of the adiabaticity of the systems.

### Литература

1. В. В. Сытько, Д. С. Умрейко, *Спектроскопические свойства и электронная структура комплексных соединений уранила (обзор)*, Ж. прикл. спектроск., **65** (1998), 819–832
2. В. В. Сытько, Д. С. Умрейко, *Фотоника соединений шестивалентного урана*, Гомель: ГГУ, 2000.
3. Д. С. Умрейко, В. В. Сытько, А. И. Комяк и др., *Спектроскопия и фотоника комплексов тяжелых элементов с достаивающейся внутренней электронной оболочкой*, Гомель: ГГУ, 2000.
4. В. В. Сытько, Д. С. Умрейко, *Оптическая спектроскопия комплексных соединений уранила*, Спектроскопия и люминесценция молекулярных систем / Под ред. Е. С. Воропая, К. Н. Соловьева, Д. С. Умрейко, Минск: БГУ, 2002, 23–53.
5. В. В. Сытько, Е. Н. Кабаева, Х. Эль-Нассер, *Корреляция значений межатомных расстояний уран–кислород, уран–лиганд и частот валентных колебаний в ураниловых соединениях*, Ж. неорг. химии, **46** (2001), 1136–11141.
6. В. В. Сытько, Е. Н. Кабаева, *Особенности корреляции межатомных расстояний уран–кислород и частот валентных колебаний группы  $UO_2^{2+}$  в комплексных соединениях уранила*, Ж. прикл. спектроск., **69** (2002), 489–492.
7. В. В. Сытько, Е. Н. Кабаева, *Спектрально-структурные закономерности в кислородсодержащих соединениях  $U(Y)$* , Ж. неорг. химии, **48** (2003), 275–280.
8. В. В. Сытько, К. В. Бокитько, *Безызлучательные переходы в комплексных соединениях уранила*, Ж. прикл. спектроск., **63** (1996), 977–984.
9. В. В. Сытько, К. В. Бокитько, *Фотофизические процессы в комплексных соединениях уранила. 3. Безызлучательная дезактивация электронного возбуждения в комплексных соединениях уранила*, Гомель: ГГУ, 1996.
10. В. И. Покаташкин, В. В. Сытько, А. Н. Красовский, Д. С. Умрейко, *Зависимость спектроскопических свойств кристаллов пентауранилфторидов от температуры в диапазоне 4. 2–40 K*, Ж. прикл. спектроск., **66** (1999), 824–827.
11. В. И. Покаташкин, В. В. Сытько, Д. С. Умрейко, *Температурная зависимость интенсивности безфонных линий оптических спектров кристаллов  $Rb_3UO_2F_5$  в диапазоне 4. 2–40 K*, Ж. прикл. спектроск., **67** (2000), 129–131.
12. Д. С. Умрейко, В. В. Сытько, В. И. Покаташкин, *Температурная зависимость параметров безфонных линий в спектрах люминесценции соединений уранила*, Вестник БГУ, Сер. 1, № 1 (2003), 3–8.
13. C. N. Henry, S. E. Schnatterly, C. P. Slichter, *Effect of Applied Fields on the Optical Properties of Color Centers*, Phys. Rev., **137** (1965), A583–A602.
14. C. W. Struck, W. H. Fonger, *Unified model of the temperature quenching of narrow-line and broad-band emission*, J. Luminescence, **10** (1975), 1–30.
15. С. Е. Tyner, W. D. Drothing, H. G. Drickamer, *Asymmetric line shapes of localized optical excitations in condensed systems*, J. Appl. Phys., **47** (1976), 1044–1047.
16. В. И. Покаташкин, В. В. Сытько, А. Н. Красовский, С. Д. Умрейко, *Миграция энергии электронного возбуждения в кристаллах  $Rb_3UO_2F_5$  при селективном лазерном возбуждении*, Вестник БГУ, Сер. 1, № 3 (1999), С. 36–40.
17. В. И. Покаташкин, В. В. Сытько, С. Д. Умрейко, *Люминесценция и перенос энергии в замороженных растворах сульфата уранила при селективном возбуждении*, Ж. прикл. спектроск., **67** (2000), 621–625.
18. В. И. Покаташкин, В. В. Сытько, А. Н. Красовский, С. Д. Умрейко, *Люминесценция кристаллов  $Rb_3UO_2F_5$  при селективном лазерном возбуждении*, Ж. прикл. спектроск., **67** (2000), 730–734.

19. В. В. Сытько, С. Д. Умрейко, *Люминесцентные материалы на основе соединений уранила с редкоземельными элементами*, Современные вопросы оптики, радиационного материаловедения, информатики, радиофизики и электроники: Сб. научных трудов БГУ и НИИ ПФП им. А. Н. Севченко, посвященный памяти академика АН БССР Л. В. Володько, Минск: БГУ, 1997, 28–39.

20. В. В. Сытько, С. Д. Умрейко, *Люминофоры на основе фосфатных соединений уранила с редкоземельными элементами с высокой концентрацией активных ионов*, Ж. прикл. спектроск, **68** (2001), 291–302.

Гомельский государственный  
университет им. Ф. Скорины

Поступило 06.12.04

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. СКОРИНЫ