

ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ЭОЗИНА В ПЛЕНКАХ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ВИДИМЫМ В СОЧЕТАНИИ С ИНФРАКРАСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР

Е. И. Константинова^{1,2*}, Р. Ю. Боркунов², М. В. Царьков²,
И. Г. Самусев², Ю. Н. Антипов¹, В. В. Брюханов^{2*}

УДК 535.37:547.633.6

¹ Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

² Балтийский федеральный университет им. И. Канта,

236016, Калининград, ул. А. Невского, 14, Россия; e-mail: konstantinovaeliz@gmail.com;

bryukhanov_vv@mail.ru

(Поступила 6 августа 2018)

Разработана экспериментальная методика двойного видимого стационарного ($\lambda = 532$ нм) и импульсного ИК ($\lambda = 10.6$ мкм) лазерного возбуждения электронно-колебательных синглетных и триплетных состояний молекул эозина в поливиниловоом спирте. После ИК воздействия возникают замедленная флуоресценция ($\tau_{\text{зф}} \approx 0.15$ с) и термолюминесценция ($\tau_{\text{ТЛ}} = 4.7$ с) молекул эозина в полимерной матрице, константы скоростей которых зависят от температуры и наличия воды в полимере. Исследована кинетика низкотемпературных процессов генерации и затухания термолюминесценции после ИК воздействия. Выявлены две характерные стадии процессов с различной энергией активации свечения термолюминесценции: нагрев пленки в диапазоне температур 80–270 К (57.4 Дж/моль) и таяние льда в полимерной матрице в диапазоне 270–330 К (13.3 кДж/моль).

Ключевые слова: эозин, замедленная флуоресценция, термолюминесценция, поливиниловый спирт, пленка, двойное лазерное видимое и ИК возбуждение, модель Аррениуса.

We developed an experimental technique of double stationary visible ($\lambda = 532$ nm) and pulsed infrared ($\lambda = 10.6$ μm) laser excitation of the electron-vibrational singlet and triplet states of eosin molecules in polyvinyl alcohol. After infrared excitation, delayed fluorescence ($\tau_{\text{df}} \approx 0.15$ s) and thermoluminescence ($\tau_{\text{TL}} = 4.7$ s) of eosin molecules in polymer matrix occur. The rate constants of these processes depend on the temperature and the presence of the water in the polymer. The kinetics of low-temperature processes of thermoluminescence generation and quenching after IR laser pulse is studied. Two characteristic stages of the processes with different activation energies of thermoluminescence are determined: film heating in the 80–270 K temperature range (57.4 J/mole) and ice melting in the polymer matrix within the 270–330 K temperature interval (13.3 kJ/mole).

Keywords: vibrational relaxation, thermoluminescence, eosin, polyvinyl alcohol, film, double laser visible and infrared excitation, Arrhenius model.

Введение. Достижения в области лазерной спектроскопии позволили приступить к решению ряда принципиально важных задач, имеющих в настоящее время громадное практическое значение [1]: исследованию процессов транспорта тепловой энергии [2–4] в результате пико- и фемтосекундного лазерного импульсного возбуждения электронно-колебательных состояний конденсированных сред, изучению влияния наночастиц (НЧ) металлов на эффективность колебательных процессов в молекулярных системах [5], ван-дер-ваальсовых комплексов и кластеров в возбужденном и основном элек-

EOSIN THERMOLUMINESCENCE IN POLYVINYL ALCOHOL FILMS AFTER DOUBLE Vis-IR LASER EXCITATION IN A WIDE TEMPERATURE RANGE

E. I. Konstantinova^{1,2*}, R. Y. Borkunov², M. V. Tsarkov², I. G. Samusev², Y. N. Antipov¹, V. V. Bryukhanov^{2*} (¹ Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, 236000, Russia; ² Immanuel Kant Baltic Federal University, 14 A. Nevsky Str., Kaliningrad, 236016, Russia; e-mail: konstantinovaeliz@gmail.com, bryukhanov_vv@mail.ru)

тронно-колебательных состояниях [6, 7], а также люминесцирующих молекул при двойном лазерном (видимом-ИК (Вид-ИК)) возбуждении [8] и последующего переноса колебательной энергии (IVR-метод) [9, 10]. В настоящей работе исследованы особенности фотопроецессов в молекулярных системах с люминофорами в пленках поливинилового спирта (ПВС) при двойном лазерном возбуждении — стационарном видимом (твердотельный лазер, $\lambda = 532$ нм) и ИК импульсном (CO_2 -лазер, $\lambda = 10.6$ мкм). Особенностью класса флуоресцеиновых красителей типа эозина является наличие системы электронно-колебательных синглетных и триплетных уровней, обладающих высоким квантовым выходом триплетного состояния [11]. При облучении ИК импульсом возбужденных синглетных и триплетных состояний молекул красителя изменяется скорость обратной интеркомбинационной конверсии (ИКК), которая существенно зависит от импульса CO_2 -лазера. ИК воздействие увеличивает локальный разогрев колебательной системы с деформационными C–C- и C–H-колебаниями ароматических колец эозина и полимерной среды, что приводит к ускорению ИКК-переходов $T_1 \rightarrow S_1$ и увеличению интенсивности замедленной флуоресценции (ЗФ). Изменение населенности T_1 -состояний сопровождается ростом интенсивности ЗФ, которую можно назвать термолюминесценцией (ТЛ) по аналогии с термоактивированной молекулярной ЗФ [9].

В настоящей работе исследуются электронно-колебательные процессы дезактивации энергии молекул эозина, внедренных в пленки ПВС при комнатных и азотных температурах в условиях двойного лазерного возбуждения.

Эксперимент. Полимерные пленки изготовлены методом полива на предметное стекло смеси водного раствора эозина и ПВС квалификации ч.д.а. Толщина пленок после высыхания ~ 40 мкм. Концентрация красителя в пленке $C = 5 \cdot 10^{-4}$ моль/л поддерживалась постоянной. Низкотемпературные спектрально-кинетические измерения люминесценции пленок ПВС с эозином проведены на установке [12] при двойном лазерном Вид-ИК-фотовозбуждении в низкотемпературном автоматическом азотном криостате Optistat DN2-V в диапазоне температур 80—300 К при давлении 10^{-4} Торр. При спектрально-кинетических измерениях прозрачная пленка ПВС зажималась между металлическими кольцами диаметром 5 мм, через которые происходил отвод тепла. При постоянном лазерном фотовозбуждении на $\lambda = 532$ нм с помощью лазера ASG-1032 мощностью 20—50 мВт пленку облучали одиночным импульсом ИК лазера ($\lambda = 10.6$ мкм) с длительностью $\tau_{\text{ИК}} = 20$ —100 мс. ИК импульсы имели прямоугольный фронт ($\Delta t = 1$ мкс). Энергия импульса CO_2 -лазера на облучаемую поверхность пленки составляла 2 Дж. Ошибка измерений 5%. Использовано фотоприемное устройство ФПУ-ПЗС производства ООО “ЛОМО ФОТОНИКА” [13] на основе ПЗС-линейки Toshiba TCD-1304, также работающего в УФ диапазоне до 280 нм.

Результаты и их обсуждение. Двойное лазерное Вид-ИК-фотовозбуждение осуществлялось следующим способом. При стационарном лазерном возбуждении ($\lambda = 532$ нм) синглетных и триплетных состояний молекул эозина ($C = 4 \cdot 10^{-4}$ моль/л) в пленке ПВС возникают все виды молекулярной люминесценции: быстрая флуоресценция, ЗФ и фосфоресценция [11]. Известно, что в отсутствие концентрационного тушения флуоресценции молекул эозина в растворах или полимерах имеет место равенство квантовых выходов $\varphi_T \approx \varphi_{\text{фл}}$. Вероятность внутренней конверсии (ВК) незначительна, а квантовые выходы ЗФ и фосфоресценции молекул эозина в таких средах одного порядка ($\approx 10^{-2}$).

Рассмотрим спектральные и энергетические процессы, происходящие в синглетных и триплетных возбужденных состояниях молекул эозина в пленках ПВС после поглощения ИК импульса. На рис. 1 представлены возможные фотопроецессы при двойном лазерном Вид-ИК-возбуждении молекул эозина в ПВС. При возбуждении колебательных состояний S_0 , S_1 , T_1 происходит нагрев пленки с красителем с выделением тепловых энергий Q_1 , Q_2 , Q_3 , которые зависят от плотности колебательных уровней (рис. 1). При воздействии ИК импульсом длительностью $\tau_{\text{ИК}}$ энергия колебаний молекул красителя и молекул полимера рассеивается в результате внутримолекулярной колебательной релаксации ($\tau_{\text{рел}} \approx 10^{11}$ — 10^{13} с $^{-1}$) и межмолекулярного переноса [10] и превращается в тепловую энергию локального нагрева пленки ПВС. Проанализируем каналы преобразования электронно-колебательной энергии в образце после ИК воздействия.

Экспериментально установлено, что ИК импульс не возбуждает свечение флуоресценции пленок ПВС с эозином, а лишь нагревает пленку. При стационарном фотовозбуждении электронно-колебательных состояний эозина ($\lambda = 32$ нм) после ИК импульса происходит возбуждение колебательных мод S_1 - и T_1 -состояний и энергия системы распределяется по всем колебательным модам полимерной пленки и молекул эозина, а затем переходит в тепло [14]. Распределение энергии по колебательным

уровням происходит в результате переноса колебательной энергии в соответствии с ИК спектром ПВС и эозина и спектром поглощения молекул воды в полимере [15, 16].

На рис. 2 представлены спектры флуоресценции при лазерном стационарном фотовозбуждении ($\lambda = 532$ нм) молекул эозина ($C = 5 \cdot 10^{-4}$ М) в ПВС, через $\Delta t = 50$ мс после воздействия ИК импульсом ($\tau_{\text{ИК}} = 100$ мс) и кинетическая кривая ТЛ. Анализ спектров флуоресценции эозина в ПВС (рис. 2, а) показывает, что после ИК воздействия изменяется интенсивность флуоресценции, наблюдается небольшой длинноволновый сдвиг ее максимума и появляется плечо в красной области 560—580 нм со смещением $\Delta\lambda = 5$ —9 нм. Такие изменения в спектре флуоресценции проявляются после ИК воздействия на пленку ПВС с эозином, прошедшую сушку при комнатной температуре в течение 24 ч при относительной влажности воздуха $\sim 50\%$.

Кинетическую кривую ТЛ эозина в пленке ПВС, зарегистрированную на $\lambda = 570$ нм (рис. 2, б), можно разбить на три области, относящиеся к различным фотофизическим процессам: 1 — нарастание ТЛ после ИК воздействия (возбуждение); 2 — кинетика затухания ЗФ молекул эозина; 3 — кинетика затухания ТЛ при охлаждении пленки. Область 1 практически линейна и представляет собой процесс нагрева пленки ПВС при воздействии ИК импульсом.

В наших экспериментах области 2 и 3 кинетических кривых аппроксимированы моноэкспоненциальными зависимостями, при этом характерные времена жизни ЗФ и ТЛ $\tau_{3\Phi} \approx 0.15$ с и $\tau_{\text{ТЛ}} = 4.7$ с. Отметим, что время жизни ЗФ $\tau_{3\Phi}$, связанное с ИКК-переходом $T_1 \rightarrow S_1$ [11], после ИК воздействия

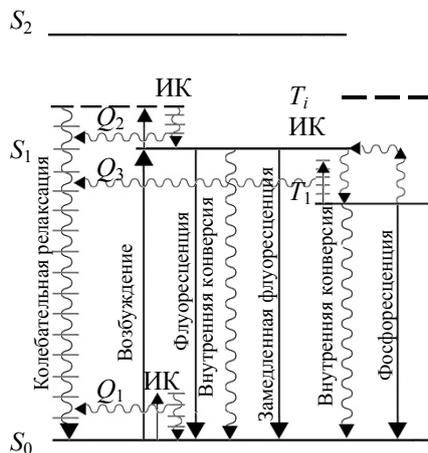


Рис. 1. Диаграмма электронно-колебательных переходов в молекуле эозина ($C = 4 \cdot 10^{-4}$ моль/л) при двойном (фотонном) лазерном (Вид-ИК) фотовозбуждении пленок ПВС

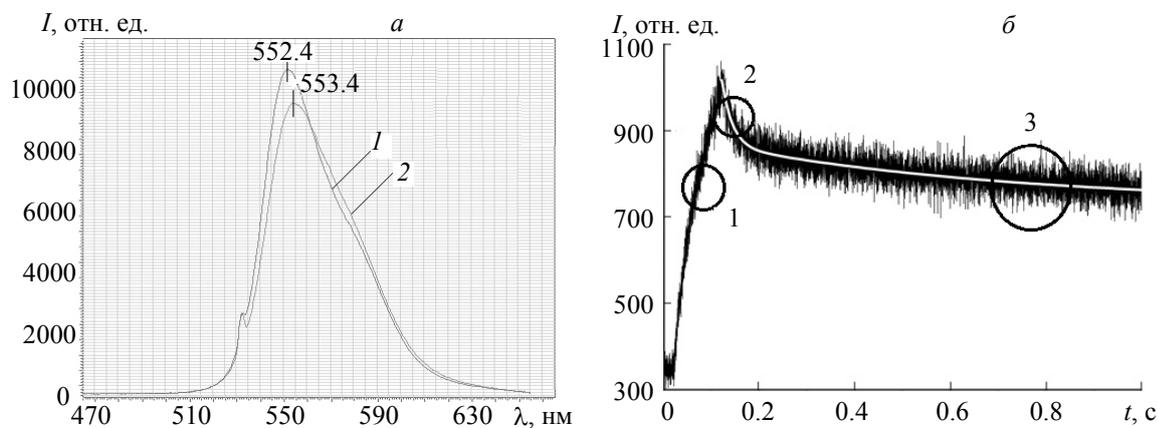


Рис. 2. Спектры флуоресценции (а) молекул эозина ($C = 5 \cdot 10^{-4}$ моль/л) в ПВС при стационарном ($\lambda = 532$ нм) возбуждении (1) и через $\Delta t \approx 50$ мс после воздействия ИК импульса (2); б — кинетика люминесценции молекул эозина в пленке ПВС на $\lambda_{\text{рег}} = 570$ нм после воздействия ИК импульса ($\lambda = 10.6$ мкм): 1 — ИК возбуждение; 2 — ЗФ; 3 — ТЛ; аппроксимация в программе OriginPro

в точности совпадает с временем жизни ЗФ молекул эозина в пленке ПВС, измеренным при комнатной температуре (20 °С) [17, 18].

Наиболее интересные спектрально-кинетические сведения о процессах в пленке ПВС с эозином получены при анализе спектров ТЛ (рис. 2, *a*) при Вид-ИК-фотовозбуждении. С этой целью использовано разработанное в ООО “ЛОМО ФОТОНИКА” фотоприемное устройство на основе ПЗС-линейки с временным разрешением 3 мс [13]. На рис. 3 представлены спектральные кинетические кривые затухания ТЛ пленок ПВС эозина при Вид-ИК-фотовозбуждении. Анализируя набор этих кривых, можно отметить в спектре ТЛ различающиеся по виду и механизму кинетики фотофизических процессов после ИК воздействия на электронные состояния эозина (см. рис. 2, *a*). Установлено, что кинетика затухания ТЛ на всех длинах волн описывается экспоненциальной зависимостью

$$I_{\text{ТЛ}} = I_0 \exp(-t/\tau_{\text{ТЛ}}), \quad (1)$$

где $I_{\text{ТЛ}}$ — мгновенная интенсивность ТЛ; I_0 — начальная интенсивность ТЛ; t — текущее время; $\tau_{\text{ТЛ}}$ — время затухания ТЛ. Времена затухания ТЛ для каждой кинетической кривой примерно одинаковые (~4.7 с). Кроме того, зарегистрированные спектральные кинетические затухания ТЛ различаются. Так, в синей области спектра ТЛ (540—550 нм) после ИК воздействия сначала происходит резкое тушение свечения, затем его затухание при охлаждении пленки до комнатной температуры. В длинноволновой области (565—580 нм), наоборот, наблюдается резкий рост интенсивности ТЛ и последующее затухание свечения после возвращения системы в возбужденное электронно-колебательное состояние S_1 . Отметим, что кинетика ТЛ на $\lambda = 560$ нм (рис. 3) не изменяется и в этой точке происходит переход от одного типа кинетики к другому. В этой же области наблюдается деформация спектра флуоресценции эозина в ПВС (рис. 2, *a*) и образуется плечо 560—580 нм. Представляет интерес исследовать обнаруженные спектральные изменения ТЛ пленок ПВС с эозином при Вид-ИК-фотовозбуждении при изменении физико-химического состояния аморфного полимера: температуры, плотности, наличия физически сорбированной воды в порах. Спектральные изменения ТЛ (рис. 3) в пленках ПВС с эозином значительно трансформируются после термической обработки пленок с красителем в сушильном шкафу при 60 °С в течение 8 ч и более. Так, трансформация кривых свечения ТЛ происходит на $\lambda = 565, 570$ и 580 нм таким образом, что кинетика ТЛ становится аналогичной кривым для $\lambda = 540$ и 550 нм (см. рис. 3). Следует отметить, что при замене гидрофобной полимерной матрицы на другую (поливинилбутираль, полиметилметакрилат и др.) после ИК воздействия наблюдается только один тип кинетики затухания ТЛ во всем исследуемом диапазоне 530—580 нм. Таким образом, наличие молекул воды в ПВС с эозином существенно влияет на процессы электронно-колебательной релаксации после ИК воздействия, что проявляется в спектрах излучения ТЛ эозина в области 560—580 нм.

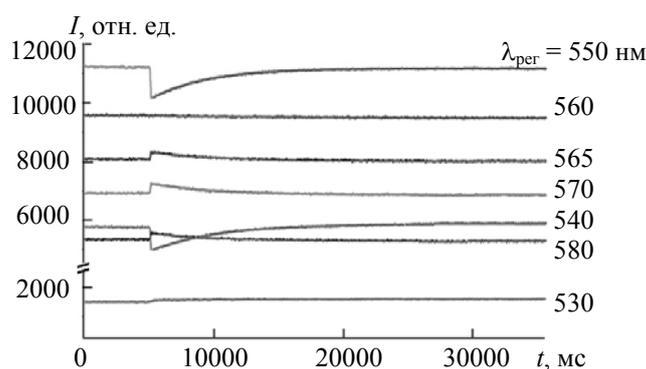


Рис. 3. Спектральные кривые затухания ТЛ эозина ($C = 5 \cdot 10^{-4}$ М) в пленке ПВС на различных длинах волн регистрации спектра

Рассмотрим возможный механизм спектрально-кинетических изменений ТЛ при Вид-ИК-фотовозбуждении. Предполагаем, что молекулы воды влияют на перераспределение колебательных мод триплетного состояния T_1 после ИК воздействия. При практически мгновенном импульсном ИК воздействии на среду происходит эффективный нагрев колебательной системы в результате передачи энергии по колебательным комплексам $\cdots\text{H}-\text{O}-\text{H}\cdots$ и локальный нагрев колебательных мод деформации.

ционных С–С- и С–Н-связей полимера [4, 10, 19], что сопровождается увеличением скорости обратной ИКК $T_1 \rightarrow S_1$ и интенсивности ЗФ молекул эозина в ПВС. Одновременно наблюдаются изменения электронно-колебательной системы S_1 -состояния (рис. 2, а), проявляющиеся в деформации спектра флуоресценции в длинноволновой области. Для определения характера влияния колебательных мод на процессы ТЛ необходимы дополнительные спектральные исследования, что является предметом дальнейшей работы.

Представляет интерес изучить температурные особенности ТЛ пленок ПВС с эозином при двойном лазерном Вид-ИК-фотовозбуждении в широком диапазоне температур 80–330 К. Исследовались пленки ПВС с эозином, полученные при комнатной температуре и относительной влажности воздуха 50 %. На рис. 4 представлены кривые затухания ТЛ пленок ПВС с эозином при температурах 78, 170, 270 К, аппроксимированные в программе OriginPro.

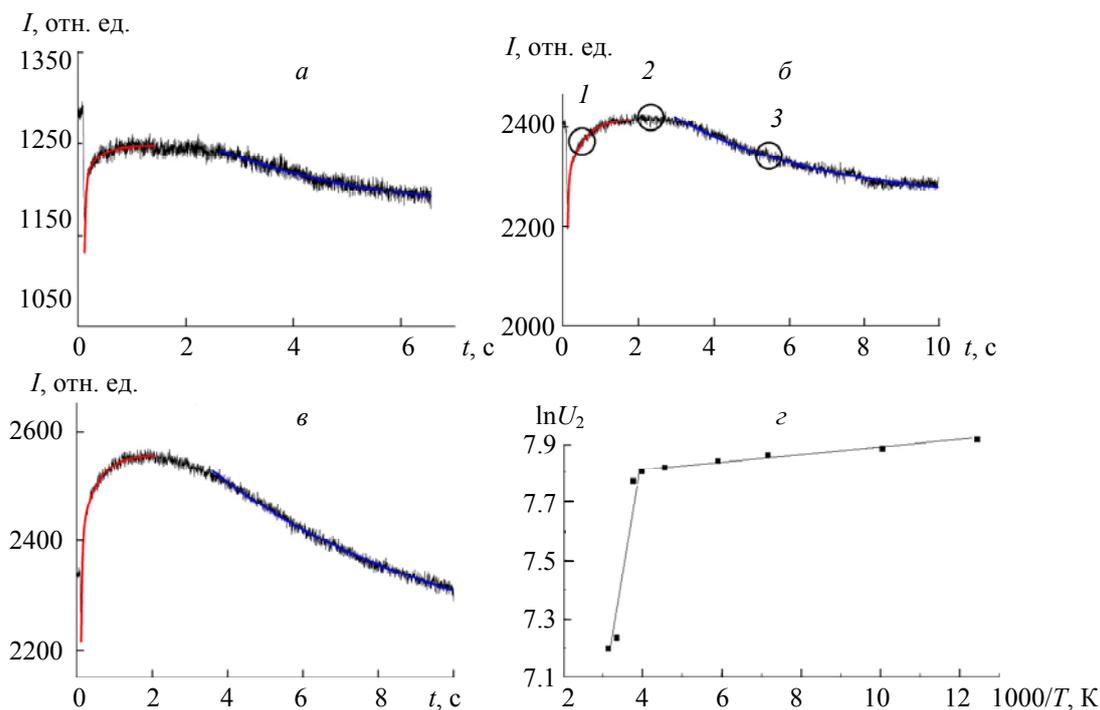


Рис. 4. Кинетические кривые ТЛ пленок ПВС с эозином ($C = 5 \cdot 10^{-4}$ М) при температурах 78 (а), 170 (б) и 270 К (в) после ИК воздействия на $\lambda = 570$ нм; г — зависимость логарифма интенсивности ТЛ от обратной температуры

Анализируя спектральные температурные зависимости ТЛ на $\lambda = 570$ нм, можно отметить нарастание, переход через максимум и последующее затухание ТЛ. Кинетика ТЛ в диапазоне $\lambda = 560$ –580 нм после ИК воздействия смоделирована функциями [19]:

$$U_1(t) = U_{10} \exp[a_1(t - t_1)], \quad (2)$$

$$U_2(t) = \{U_{20} + U_m \exp[b(t - t_0)^2]\} \exp[-a_2(t - t_2)], \quad (3)$$

$$U_3(t) = U_{30} \exp[-a_3(t - t_3)], \quad (4)$$

где $U_1, U_2, U_3, U_{10}, U_{20}, U_{30}, U_m$ — интенсивности энергетических процессов низкотемпературной ТЛ в областях 1, 2 и 3 кинетической кривой (рис. 4) в диапазонах времен t_0, t_1, t_2, t_3 ; a_1, b, a_2, a_3 — постоянные параметры нагрева и охлаждения пленки после ИК воздействия. Экспериментальные данные позволили провести математическое моделирование низкотемпературных процессов ТЛ в диапазоне температур 80–300 К. Участок 1 на рис. 4, б отображает процесс нагревания пленки, который моделируется зависимостью (2). Рассеянная в полимере при возбуждении ИК импульсом колебательная энергия вызывает нагрев пленки и усиление ТЛ красителя за счет ускорения ИКК-переходов $T_1 \rightarrow S_1$ согласно экспоненциальной зависимости (2). Параметр a_1 , определяющий процессы теплопроводности

сти и температуропроводность пленок ПВС с молекулами воды, экспериментально трудно измерить при низких температурах. Участок 3 отображает процесс охлаждения пленки ПВС с эозином после ИК возбуждения, его можно аппроксимировать моноэкспоненциальной зависимостью по формуле (4) с временем затухания ТЛ $\tau_{\text{ТЛ}} = 3.92$ с. Результат аппроксимации процессов затухания ТЛ остывающей пленки ПВС с эозином совпадает с данными [12], полученными ранее при исследовании температуропроводности ПВС с красителем при комнатной температуре.

Таким образом, различные стадии кинетики ТЛ, сопровождающиеся процессами ИК нагрева и охлаждения пленок ПВС, описываются экспоненциальными зависимостями с различными константами скорости и могут быть интерпретированы стандартными физическими моделями [21]. Однако при этом имеется некоторый временной интервал, соответствующий переходной области между указанными выше стадиями кинетики затухания ТЛ. Математическое описание этого процесса может быть представлено функцией (3). Установлено, что положение максимумов функций (4) на рис. 4 зависит от температуры среды, причем эта зависимость в координатах $\ln I_{\text{ТЛ}}$ от $1/T$ в диапазоне температур 80—270 К линейная. С использованием модели Аррениуса [22]

$$U_1^{\max} \sim \exp(-E_A/RT) \quad (5)$$

рассчитана энергия активации низкотемпературного процесса ТЛ: $E_A = 57.4$ Дж/моль. В температурном диапазоне 270—300 К данная зависимость также линейная, однако энергия активации процесса резко увеличивается при 270 К до 13.3 кДж/моль, что совпадает с энергией активации при нагреве и таянии замерзшей остаточной воды в матрице ПВС и свидетельствует о возникновении фазового перехода [23]. При этом вода становится жидкой в объеме микрополостей ПВС, где в результате возникновения сильных водородных связей с цепями полимера получает развитие процесс колебательной α -релаксации при большой энергии активации [24, 25].

Таким образом, кинетика ТЛ молекул эозина в пленках ПВС зависит от температуры и наличия остаточной воды в полимерной пленке. После размораживания остаточной воды в ПВС резко увеличивается энергия активации тушения ТЛ в диапазоне 270—330 К, что связано с фазовым переходом воды и ускорением колебательных процессов в полимере.

Заключение. Разработанная методика двойного видимого стационарного ($\lambda = 532$ нм) и ИК импульсного ($\lambda = 10.6$ мкм) лазерного фотовозбуждения молекулярных систем в тонких полимерных пленках поливинилового спирта позволяет исследовать электронно-колебательные процессы с участием возбужденных триплетных и синглетных состояний молекул эозина. Показано, что люминесценция молекул эозина в поливинилово-м спирте после ИК воздействия при комнатной температуре среды определяется двумя фотофизическими процессами — замедленной флуоресценцией с временем затухания $\tau_{\text{зф}} \approx 0.15$ с и термолюминесценцией с $\tau_{\text{ТЛ}} = 4.7$ с, обусловленной охлаждением пленки при передаче тепловой энергии в среду. При спектральном исследовании кинетики термолюминесценции эозина в поливинилово-м спирте обнаружено, что после ИК воздействия интенсивности термолюминесценции на различных длинах волн различаются по эффективности активации колебательных мод при наличии в пленке молекул воды. Предположено, что это влияние связано с перераспределением энергии электронно-колебательных процессов T_1 -состояния молекул эозина в поливинилово-м спирте с участием колебательных мод $\cdots\text{H}-\text{O}-\text{H}\cdots$ остаточной воды в полимере, влияние которых проявляется в кинетике затухания в длинноволновой области спектра термолюминесценции (560—580 нм). Исследованы спектрально-кинетические процессы термолюминесценции эозина в пленках поливинилового спирта при двойном лазерном Вид-ИК-возбуждении в диапазоне температур 80—330 К, рассчитаны кинетические параметры генерации термолюминесценции и ее затухания в полимерной пленке. В пленках наблюдаются два характерных процесса с различной аррениусовской энергией температурной активации свечения термолюминесценции: процесс в диапазоне температур 80—270 К с низкой энергией активации (57.4 Дж/моль) связан с нагревом пленки поливинилового спирта с остаточной водой и процесс с высокой энергией активации (13.3 кДж/моль) в диапазоне температур 270—330 К, обусловленный нагревом пленки и таянием льда в микрополостях полимерной матрицы и развитием колебательной α -релаксации в пленке поливинилового спирта.

Предлагаемый метод двойного лазерного Вид-ИК-фотовозбуждения электронно-колебательных состояний флуоресцирующих молекул позволяет исследовать релаксационные процессы в конденсированных средах и получать практические результаты о скоростях переноса тепла в конденсированной среде.

Авторы признательны А. В. Мельникову, вед. инженеру ООО “ЛОМО ФОТОНИКА”, канд. тех. наук, за разработку прибора и его программирование.

Результаты получены в рамках государственного задания Минобрнауки РФ № 3.5022.2017/8.9 и программы “5-100” повышения конкурентоспособности российских вузов.

- [1] **В. С. Летохов.** Успехи физ. наук, **118**, № 2 (1976) 149—299
- [2] **F. Yang, L. Jiang, S. Wan, Zh. Cao, L. Liu, M. Wang, Y. Lu.** Opt. Laser Technol., **93** (2017) 194—200
- [3] **В. В. Комаров.** Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия, № 5 (2013) 3—7
- [4] **S. L. Sobolev.** Int. J. Heat Mass Transf., **94** (2016) 138—144
- [5] **A. A. I. Khalil.** Opt. Laser Technol., **75** (2015) 105—114
- [6] **Г. Н. Макаров.** Успехи физ. наук, **187**, № 3 (2017) 241—276
- [7] **D. Ciofini, I. Cacciari, S. Siano.** Measurement, **122** (2017) 200—206
- [8] **M. A. Odeneve, A. J. Stace.** J. Phys. Chem. Chem. Phys., **7** (2005) 998—1004
- [9] **P. M. Felker, W. R. Lambert, A. H. Zewail.** J. Chem. Phys., **82** (1985) 5958
- [10] **А. А. Макаров, А. Л. Малиновский, Е. А. Рябов.** Успехи физ. наук, **182**, № 10 (2012) 1047—1080
- [11] **С. Паркер.** Фотолюминесценция растворов, Москва, Мир (1972)
- [12] **I. Samusev, R. Borkunov, M. Tsarkov, E. Konstantinova, Y. Antipov, M. Demin, V. Bryukhanov.** J. Phys.: Conf. Ser., **961** (2018) 012011
- [13] <http://lomophotonica.ru/content/view/27/107/>
- [14] **В. Л. Ермолаев.** Успехи химии, **70**, № 6 (2001) 539—561
- [15] **А. Х Купцов, Г. Н. Жижин.** Фурье-спектры комбинационного рассеяния и инфракрасного поглощения полимеров. Справочник, Москва, Физматлит (2001)
- [16] **Hung-Hsia Chen, R. Anbarasan, Long-Sheng Kuo, Ping-Hei Chen.** IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference, October 12–15, 2010, Monterey, California, USA (2010) 325—327
- [17] **Ю. Н. Антипов, Е. И. Константинова, Р. Ю. Боркунов, М. В. Царьков, И. Г. Самусев, В. В. Брюханов.** Изв. Калинингр. гос. тех. ун-та, № 49 (2018) 280—293
- [18] **В. В. Брюханов, Б. М. Минаев, А. В. Цибулькинова, В. А. Слежкин.** Опт. и спектр., **119**, № 1 (2015) 32—41 [V. V. Bryukhanov, B. F. Minaev, A. V. Tcibulnikova, V. A. Slezhkin. Opt. Spectrosc., **119**, N 1 (2015) 29—38]
- [19] **Y. Satokawa, T. Shika.** Macromolecules, **41** (2008) 2908—2913
- [20] **А. М. Седлецкий.** Классы аналитических преобразований Фурье и экспоненциальные аппроксимации, Москва, Физматлит (2005)
- [21] **Э. М. Карташов.** Аналитические методы в теплопроводности твердых тел, Москва, Высшая школа (2001)
- [22] **В. Шгиллер.** Уравнение Аррениуса и неравновесная кинетика, Москва, Мир (2000)
- [23] **I. Cendoya, D. Lo'pez, A. Alegri'a, C. Mijangos.** J. Polymer Sci. B: Polymer Phys., **39** (2001) 1968—1975
- [24] **M. Londoño, J. M. Jaramillo, J. M. Sabater Rr Vélez.** Rev. EIA, **18** (2012) 105—114
- [25] **Р. Р. Хасбиуллин, Г. С. Кулагина, Г. Н. Бондаренко, А. Е. Чалых, В. К. Герасимов, Ю. В. Костина, С. В. Никонова.** Структура и динамика молек. систем, **1**, № 14 (2007) 823—828