

УДК 53.092:53.06

## МЕХАНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И ОПТИЧЕСКИ СТИМУЛИРОВАННАЯ АНТИСТОКСОВАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ И ЛЮМИНОФОРОВ АЛЮМИНАТОВ СТРОНЦИЯ $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ и $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$

© 2024 г. А. Ф. Банишев\*

Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт” 123182 Россия, Москва  
\*e-mail: banishev@mail.ru

Поступила в редакцию 27.09.2023 г.

После доработки 25.12.2023 г.

Принята к публикации 25.12.2023 г.

Получены композитные механолюминесцирующие материалы (композиты) на основе прозрачной в видимом диапазоне спектра излучения эпоксидной смолы и мелкодисперсных порошков механолюминофоров  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  и  $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ . Исследованы механо- и фотолюминесценция композитов при комбинированном воздействии коротковолнового ( $\lambda = 405$  нм) и длинноволнового ( $\lambda = 1.06$  мкм) излучения лазеров. Исследовано затухание оптически стимулированной антистоксовой люминесценции композита при воздействии последовательности импульсов длинноволнового лазерного излучения на композит, предварительно “активированного” коротковолновым лазерным излучением. Полученный композит использовали для визуализации распространения тепла и термодформаций, возникающих при действии мощных лазерных импульсов в металлических пластинах, и распределения деформаций при механическом ударе. Для этого на поверхность исследуемых материалов наносили тонкий слой композита. Композит обладал хорошей адгезией к поверхности материалов и высоким выходом механолюминесценции, что позволяло с хорошим пространственным и временным разрешением визуализировать распределение температуры и деформаций поверхности.

**Ключевые слова:** лазерное воздействие, люминофоры, композит, напряжение, деформация, фотолюминесценция, механолюминесценция, визуализация деформаций, разрушение материалов.

DOI: 10.31857/S1028096024050031, EDN: FUMTWP

### ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации детали различных конструкций, агрегатов и машин подвергаются механическим и тепловым нагрузкам, которые приводят к деформации материала деталей, образованию микротрещин и их разрушению. Поэтому исследование поведения материалов под воздействием тепловых и механических нагрузок представляет большой интерес для обеспечения безопасности эксплуатации различных конструкций, агрегатов и машин. В частности, важна информация о зависимости деформации используемого материала от внешних нагрузок, а также о критических нагрузках, приводящих к разрушению материала. В связи с этим возникает

необходимость в разработке надежных и информативных методов диагностики напряжений и деформаций в материалах, подвергающихся воздействию внешних сил. К известным устройствам и методам, обычно используемым для измерения этих параметров, относятся тензодатчики, фотоупругие покрытия, метод корреляции цифровых изображений и интерференционные методы [1–4]. В последнее время большой интерес проявляют к исследованию механолюминесцирующих функциональных материалов (механолюминофоров) и созданию на их основе новых типов приборов и устройств механо-пьезо-фотоники. Механолюминесцентные материалы, излучающие свет при механическом воздействии (сжатие, удар, изгиб, трение, ультразвук), могут быть

использованы в качестве сенсорных элементов в интеллектуальных системах и робототехнике, в визуализации распределения механических напряжений и деформаций, в диагностике поврежденных различных деталей и конструкций [5–18], в качестве “фотонной кожи” [10, 11], а также в медицине в качестве фотокатализаторов [19]. Как правило, излучающими центрами (центрами люминесценции) в этих материалах являются ионы редкоземельных элементов и реже – ионы переходных металлов (как правило,  $\text{Cu}^+$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ) [20, 21].

В последнее время появляются работы по исследованию материалов, которые проявляют механолюминесценцию в ближней инфракрасной (ИК) области спектра. Излучение этой области хорошо проходит через ткани и кожу тела человека, поэтому есть обнадеживающие перспективы практического применения этих материалов в биовизуализации для изучения сложных биомеханических свойств тела и соответствующих искусственных имплантов [22] (например, искусственных костей, суставов).

Несмотря на большое количество полученных механолюминофоров, механизм возбуждения механолюминесценции остается не до конца изученным. Более вероятной причиной возбуждения механолюминесценции в большинстве материалов с редкоземельными элементами считается возникновение локальных пьезоэлектрических полей при деформации материала. Под действием пьезоэлектрических полей происходит сдвиг (активация) заселенных электронами уровней “ловушек”, расположенных ниже зоны проводимости, которыми могут являться уровни собственных дефектов и (или) введенных дополнительных примесей [5, 10, 11, 13, 18–20]. Для выявления собственных дефектов и примесей в материалах в ряде случаев используют явление оптически стимулированной люминесценции. Суть этого явления заключается в следующем. Материал предварительно облучают коротковолновым излучением (или потоком частиц с соответствующей энергией), это приводит к заселению уровней дефектов и примесей (ловушек). Затем материал облучают более длинноволновым излучением, как правило, из видимого или ближнего ИК-диапазона. Действие этого излучения приводит к возбуждению (активации) электронов на уровнях ловушек и переходу их в зону проводимости (или дырок в валентную зону из дырочных ловушек). Далее электроны могут быть захвачены на верхние свободные уровни люминесцирующих центров и излучательно перейти на основной уровень или излучательно рекомбинировать с люминесцирующим центром или с дырками в валентной зоне.

Излучение люминесцирующих центров может быть как стоковым, так и антистоксовым по отношению к стимулирующему длинноволновому излучению. Интенсивность люминесценции пропорциональна концентрации ловушек (примесей или дефектов), что используют для количественных измерений концентрации дефектов.

Целью настоящей работы является исследование оптически стимулированной антистоксовой люминесценции (ОСАЛ) и механолюминесценции композитных материалов на основе прозрачной в видимой области спектра излучения эпоксидной смолы и порошков люминофоров: нецентросимметричного  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$  и центросимметричного  $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$ . Приведены примеры возможного практического использования исследованных механолюминесцирующих композитных материалов для визуализации механических напряжений, возникающих в образцах из нержавеющей стали при механическом ударе, и для визуализации распространения тепла и термонапряжений при воздействии мощного лазерного импульса.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследований были приготовлены композитные материалы на основе прозрачного в видимой области спектра излучения эпоксидной смолы и мелкодисперсного порошка люминофора с нецентросимметричной кристаллической структурой  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$  и порошка люминофора с центросимметричной кристаллической структурой  $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$ . Средний размер частиц порошка составлял 60 мкм. Соотношение смолы и порошка люминофора в композитах составляло 1 : 1. Оба люминофора при облучении их коротковолновым излучением ( $\lambda < 450$  нм) имеют широкий спектр люминесценции –  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$  с максимумом при 520 нм (в зеленой части спектра),  $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$  с максимумом при 500 нм (в голубой части спектра) – и характеризуются длительным послесвечением. Центрами люминесценции в обоих люминофорах являются ионы  $\text{Eu}^{2+}$ , а добавление  $\text{Dy}^{3+}$  значительно увеличивает длительность послесвечения. Увеличение длительности послесвечения указывает на то, что уровни  $\text{Dy}^{3+}$  лежат ниже зоны проводимости и являются неглубокими электронными ловушками. Кроме ловушек, образованных ионами  $\text{Dy}^{3+}$ , вероятно, имеются ловушки, образованные дефектами кристаллической структуры люминофоров. Предполагается [23, 24], что уровни ловушек, в том числе и уровни  $\text{Dy}^{3+}$ , расположены под зоной проводимости на глубине не более  $\Delta E < 1$  эВ.

Известно, что люминофор  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$  обладает ярко выраженным свойством механолюминесценции в отличие от  $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ . Для исследования люминесценции полученных композитов на поверхность прозрачной стеклянной пластины наносили композитный механолюминесцирующий слой толщиной 370 мкм. На рис. 1 представлена схема исследования спектра фотолюминесценции и ОСАЛ образцов композитов. Возбуждение фотолюминесценции композитов проводили излучением коротковолнового непрерывного лазера (диодного лазера) с длиной волны  $\lambda = 405$  нм, плотностью мощности излучения  $I = 1.8 \times 10^{-2}$  Вт/см<sup>2</sup>. Для наблюдения ОСАЛ композит предварительно, в течение 4–5 с подвергали воздействию излучения коротковолнового лазера с длиной волны  $\lambda = 405$  нм. Возбуждение ОСАЛ проводили воздействием ближнего ИК излучения импульсного YAG:Nd<sup>3+</sup> лазера (длина волны  $\lambda = 1.06$  мкм, длительность импульса  $\tau = 1.5$  мс, плотность мощности излучения  $I = 3 \times 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>). Энергии кванта излучения этого лазера ( $\approx 1.16$  эВ) недостаточно для возбуждения фотолюминесцирующих центров  $\text{Eu}^{2+}$ , но достаточно для возбуждения и перевода электронов с неглубоких ловушек в зону проводимости. Исследованы спектры и кинетика ОСАЛ при одновременном воздействии лазеров, а также затухание ОСАЛ после выключения коротковолнового лазера.

Для регистрации спектров фотолюминесценции и ОСАЛ использовали линейный ССД спектрометр Glacier, позволяющий регистрировать одновременно весь спектр излучения в диапазоне 400–1000 нм. Спектры фотолюминесценции и ОСАЛ композитов показаны на рис. 2. Спектры ОСАЛ лежат в видимой области спектра, т.е. являются антистоксовой люминесценцией по отношению к возбуждающему ОСАЛ излучению ИК лазера с  $\lambda = 1.06$  мкм. Спектры фотолюминесценции композитов, возбуждаемые непрерывным коротковолновым лазером ( $\lambda = 405$  нм), показаны на рис. 2а и 2б (кривые 1). При совместном воздействии лазеров интенсивность спектра на обоих композитах значительно возрастает (кривые 2 на рис. 2а и 2б). В этом случае спектр является суперпозицией фотолюминесценции, возбуждаемой лазером с  $\lambda = 405$  нм, и ОСАЛ, возбуждаемой ИК лазером с  $\lambda = 1.06$  мкм. Если облучать образец импульсами лазера с  $\lambda = 1.06$  мкм после выключения лазера с  $\lambda = 405$  нм, то амплитуда ОСАЛ с каждым последующим импульсом уменьшается. На рис. 2а (кривые 3–5) и 2б (кривые 3–6) показаны временные изменения амплитуды ОСАЛ, воз-

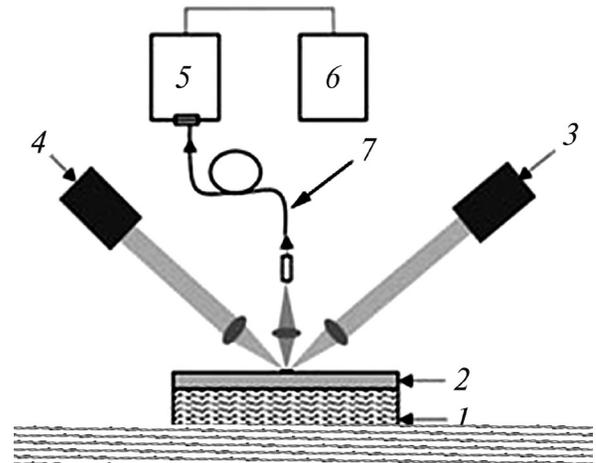
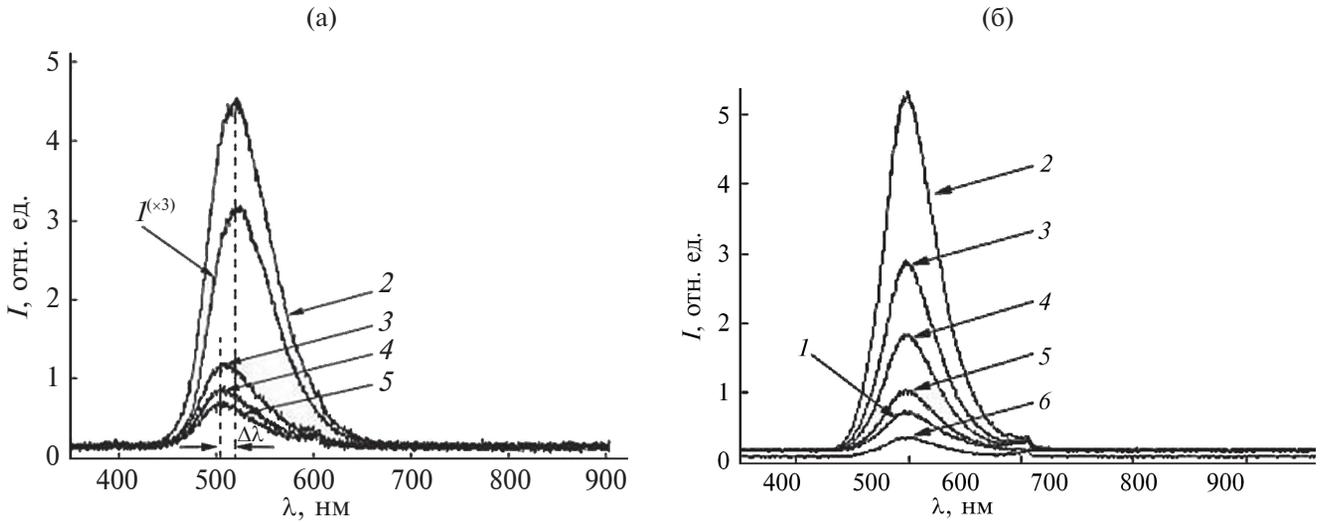


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – подложка из стекла; 2 – композиционный механолюминесцирующий слой; 3 – непрерывный лазер с длиной волны  $\lambda = 405$  нм; 4 – импульсный YAG:Nd лазер с  $\lambda = 1.06$  мкм; 5 – спектрометр (монохроматор); 6 – цифровой осциллограф; 7 – оптоволокну.

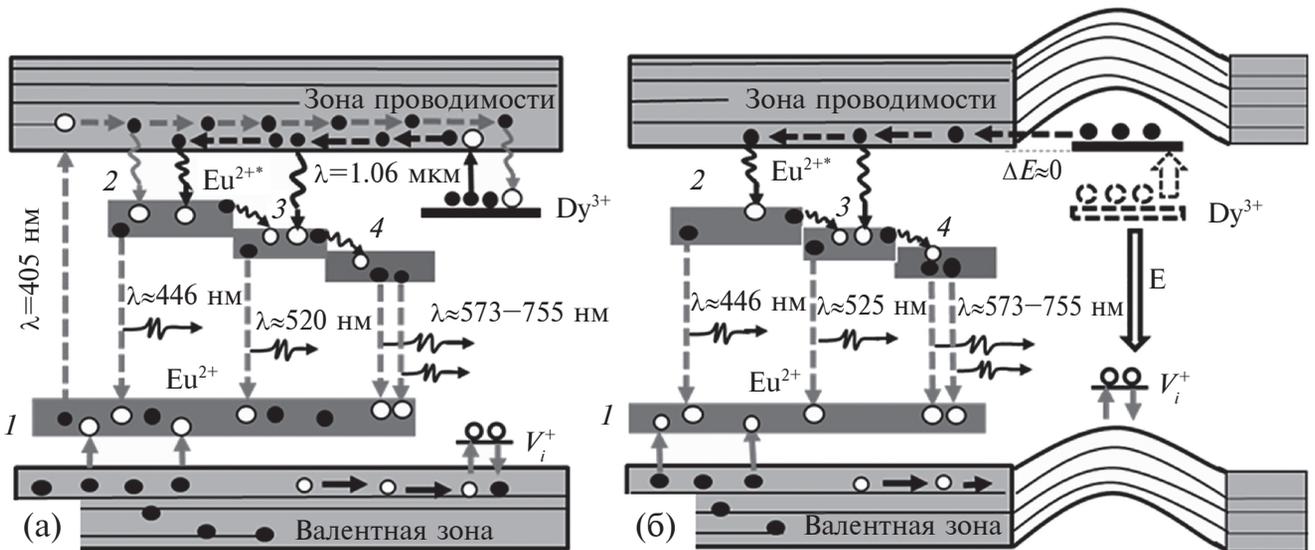
буждаемой последовательностью импульсов лазера после выключения непрерывного лазера. На образцах, которые предварительно не облучали с помощью коротковолнового лазера, ОСАЛ при воздействии импульсов длинноволнового лазера не наблюдалась.

Как следует из рис. 2а и 2б, ОСАЛ композита с люминофором  $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  затухает значительно медленнее, чем ОСАЛ композита с люминофором  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ , что может быть связано с более глубоким энергетическим положением уровней ловушек в люминофоре  $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ . Смещение максимума интенсивности ОСАЛ композита с люминофором  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  в область более коротких длин волн, после выключения лазера с  $\lambda = 405$  нм, может быть связано с неоднородностью уширения люминесценции люминофора  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ . Фотолюминесценция люминофора  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  обусловлена излучательными переходами электронов между энергетическими уровнями  $4f^7-4f^65d$  ионов европия  $\text{Eu}^{2+}$ . Вероятно, имеются и другие излучательные центры, которые формируют с ионами  $\text{Eu}^{2+}$  общий неоднородно уширенный контур люминесценции.

На рис. 3 показана схема электронных уровней люминесцирующих центров ионов  $\text{Eu}^{2+}$  и метастабильных электронных уровней ловушек (уровней ионов  $\text{Dy}^{3+}$ ) в кристаллической матрице люминофора  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ , а также указаны радиационные переходы иона европия  $\text{Eu}^{2+}$ . Механизм возбуждения фотолюминесценции и длительного



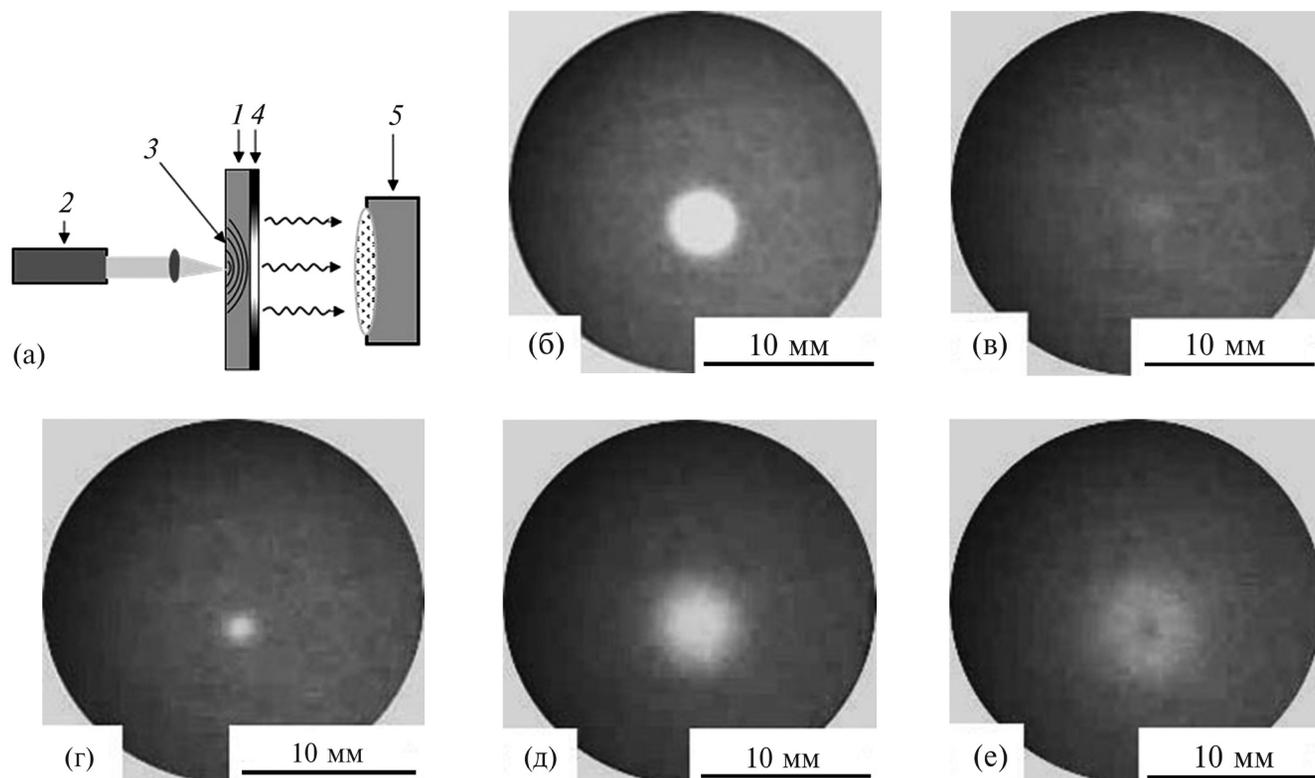
**Рис. 2.** Спектры фотолюминесценции и оптически стимулированной антистоксовой люминесценции  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  (а) и  $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  (б): фотолюминесценция возбуждаемая непрерывным лазером с  $\lambda = 405$  нм ( $I$ , увеличено в три раза); при одновременном воздействии непрерывного и импульсного YAG:Nd-лазера ( $\lambda = 1.06$  мкм) (2); 3 – через а) – 1 (3), 2 (4), 3 с (5) и б) – 10 (3), 20 (4), 30 (5), 40 с (6) после выключения непрерывного лазера.



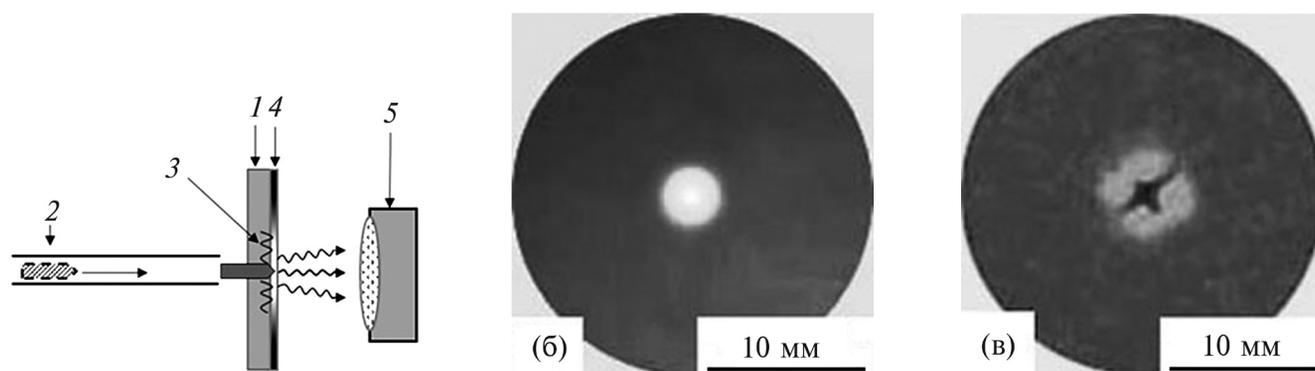
**Рис. 3.** Схема уровней и переходов между ними люминесцентных центров ионов европия ( $\text{Eu}^{2+}$ ) и ловушек (ионов  $\text{Dy}^{3+}$ ). Излучательные переходы обозначены пунктирными линиями, релаксационные – зигзагообразными. Цифрами показаны основной (1) и возбужденные уровни (2–4) европия. а – Действие коротковолнового излучения ( $\lambda = 405$  нм) приводит к возбуждению фотолюминесценции ионов  $\text{Eu}^{2+}$  и заселению уровней ловушек  $\text{Dy}^{3+}$  (темно-серые стрелки). Фотолюминесценция при действии длинноволнового излучения ( $\lambda = 1.06$  мкм) обусловлена возбуждением заселенных уровней ловушек (светло-серые стрелки). б – Механолюминесценция при ударе бойка обусловлена деформацией материала и смещением заселенных уровней ловушек: в результате становятся возможными туннельные переходы электронов в зону проводимости.

послесвечения люминофора  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  обсужден в ряде работ, например, [10–11]. Действие коротковолнового излучения приводит к возбуждению и фотолюминесценции ионов европия  $\text{Eu}^{2+}$  и одновременно, к заселению уровней ловушек, как показано на рис. 3а. Наблюдаемую в этом случае ОСАЛ можно объяснить тем, что,

действительно, уровни  $\text{Dy}^{3+}$  образуют под зоной проводимости неглубокие ловушки ( $\Delta E < 1$  эВ), электроны с которых переходят под действием излучения лазера с  $\lambda = 1.06$  мкм в зону проводимости. Электроны из зоны проводимости могут быть захвачены на верхние уровни ионов европия и далее перейти с излучением квантов света



**Рис. 4.** (а) – Схема эксперимента по визуализации воздействия излучения на образец: 1 – пластина из нержавеющей стали; 2 – YAG:Nd-лазер; 3 – распространение тепла и термодформации; 4 – композиционный слой; 5 – видеокамера (скорость съемки 1000 кадров/с). Визуализация распространения тепла и термодформаций в пластине из нержавеющей стали толщиной 100 мкм при воздействии мощного лазерного импульса  $I \approx 7 \times 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>: (б) – короткая вспышка фотолюминесценции механолюминесцирующего слоя, возбуждаемая тепловым излучением в момент лазерного воздействия; образец в течение первых ~20 мс (в) и через ~20 мс (г) после затухания фотолюминесценции; свечение механолюминесцирующего слоя через 300 мс (д) и 1 с (е) после затухания фотолюминесценции.



**Рис. 5.** Схема эксперимента по визуализации механического воздействия на образец (а): 1 – пластина из нержавеющей стали; 2 – боек; 3 – пробивка пластины; 4 – механолюминесцирующий слой; 5 – видеокамера (скорость съемки 50 кадров/с). Визуализация напряжений и деформаций, возникающих при разрушении (пробивке) пластины из нержавеющей стали при ударном воздействии бойка: при ударе бойка до (б) и сразу после пробивки пластины (в).

в основное состояние, образуя таким образом широкую полосу ОСАЛ с максимумом на длине волны  $\lambda = 520$  нм. Уменьшение интенсивности фотолюминесценции при воздействии лазерных импульсов с  $\lambda = 1.06$  мкм связано с последовательным, от импульса к импульсу, опустошением

уровней ловушек, т.е. перебросом электронов в зону проводимости.

Известно, что механолюминесценцию люминофоров  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  можно наблюдать только после их предварительного облучения

коротковолновым излучением ( $\lambda \leq 450$  нм). Считается, что механолюминесценция в этих люминофорах обусловлена локальными пьезоэлектрическими полями, возникающими в окрестности ловушек (ионов  $Dy^{3+}$ ) при деформации материала, которые приводят к смещению уровней ловушек и туннельному переходу электронов с заселенных уровней ловушек в зону проводимости (рис. 3б) [5, 10, 11, 14, 18–20]. Это согласуется с тем, что композит с люминофором  $Sr_4Al_{14}O_{25}:Eu^{2+}, Dy^{3+}$ , имеющий centrosymmetric кристаллическую структуру, не проявляет механолюминесценцию, хотя, как и в композите с люминофором  $SrAl_2O_4:Eu^{2+}, Dy^{3+}$ , уровни ионов диспрозия  $Dy^{3+}$  образуют неглубокие электронные ловушки.

Таким образом, как механолюминесценция, так и ОСАЛ, возбуждаемая длинноволновым лазерным излучением, обусловлены переходами электронов с заселенных уровней ловушек (уровней ионов  $Dy^{3+}$ ) в зону проводимости, только в первом случае за счет сдвига уровней ловушек при деформации материала, а во втором случае за счет поглощения квантов света.

### ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА, ДЕФОРМАЦИЙ И РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА И МЕХАНИЧЕСКОГО УДАРА

Механолюминесцирующим материалам находят все большее применение для визуализации и исследования процессов деформации и разрушения материалов, в частности для визуализации образования трещин [15, 23, 25–29]. В настоящей работе исследовано распространение тепла и деформаций в образцах из нержавеющей стали и молибдена толщиной 100–200 мкм и диаметром 30 мм при воздействии мощных лазерных импульсов. Для визуализации пространственного распространения деформаций и тепла на одну из поверхностей пластины был нанесен композитный механолюминесцирующий слой  $SrAl_2O_4:Eu^{2+}, Dy^{3+}$  толщиной 200 мкм. Предварительно поверхности пластин подвергали очистке от адсорбированных частиц и окисной пленки. На рис. 4а приведена схема проведения эксперимента. На рис. 4б–4е показано распространения тепла и термдеформаций в пластине из нержавеющей стали толщиной 100 мкм в результате воздействия мощного лазерного импульса. На свободную поверхность пластины (рис. 4а) фокусировали импульс YAG:Nd лазера ( $I \approx 7 \times 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>,

$\lambda = 1.06$  мкм,  $\tau \approx 1.5$  мс) в пятно размером  $d \approx 1.2$  мм. В результате происходил локальный нагрев пластины в области воздействия лазерного импульса. Регистрацию свечения механолюминесцирующего композитного слоя осуществляли с помощью видеокамеры (скорость регистрации 1000 кадров/с). Во время действия лазерного импульса наблюдали короткую ( $t_{\text{люм}} \approx 0.8$  мс) вспышку фотолюминесценции механолюминесцирующего слоя (рис. 4б), возбуждаемую тепловым излучением пластины. После затухания фотолюминесценции, в течение  $\sim 20$  мс свечения механолюминесцирующего слоя не наблюдали (рис. 4в), через  $\sim 20$  мс начинало появляться свечение механолюминесцирующего слоя (рис. 4г). Так как композитный материал  $SrAl_2O_4:Eu^{2+}, Dy^{3+}$  проявляет механо- и термолюминесценцию, то наблюдаемое свечение – это их суперпозиция. Механолюминесценция в данном случае обусловлена термдеформациями пластины, поэтому сложно выделить вклад каждого из этих видов люминесценции. На рис. 4д, 4е показано свечение механолюминесцирующего слоя через 300 мс и через 1 с.

На рис. 5а представлена схема исследования деформации пластины из нержавеющей стали, возникающей при пробивке бойком с коническим наконечником. Визуализация деформации осуществлена с помощью механолюминесцирующего композиционного слоя, нанесенного на поверхность пластины. Светящаяся область вокруг места пробивки (рис. 5б) обусловлена механолюминесценцией композиционного слоя, вызванной напряжениями и деформацией пластины до пробивки пластины; на рис. 5в показано распределение напряжений и деформаций сразу после пробивки. Форма светящегося пятна определяется распределением деформации, возникающей при воздействии бойка на пластину.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследован спектр люминесценции композиционных материалов при комбинированном воздействии коротковолнового и длинноволнового излучения лазеров. Показано, что на предварительно облученных коротковолновым лазерным излучением ( $\lambda = 405$  нм) композитах с люминофорами  $SrAl_2O_4:Eu^{2+}, Dy^{3+}$  и  $Sr_4Al_{14}O_{25}:Eu^{2+}, Dy^{3+}$  наблюдается оптически стимулированная антистоксовая люминесценция при воздействии длинноволнового лазерного излучения ( $\lambda = 1.06$  мкм), в то время как механолюминесценция проявляется только в композите с люминофором  $SrAl_2O_4:Eu^{2+}, Dy^{3+}$ , имеющем

нецентросимметричную кристаллическую структуру. Оптически стимулированная антистоксовая люминесценция и механолюминесценция обусловлены активацией электронов на уровнях ловушек (уровнях ионов  $Dy^{3+}$ ): в первом случае за счет поглощения кванта излучения лазера, во втором случае за счет сдвига уровней ловушек при деформации материала.

Исследовано распространение тепла и распределение деформаций в материалах при воздействии мощных лазерных импульсов и при механическом ударе. Для визуализации распространения тепла и распределения деформаций использовали механолюминесцирующие композиты на основе полимера и порошка люминофора  $SrAl_2O_4:Eu^{2+}, Dy^{3+}$ , нанесенные на поверхность исследуемых материалов. Показано, что пространственное распределение интенсивности свечения механолюминесцирующего слоя и ее изменения с хорошим пространственным и временным разрешением визуализируют деформации и распространение тепла в материалах при механическом ударе и при воздействии лазерных импульсов.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность В.В. Внуку научному сотруднику Национального научно исследовательского центра “Курчатовский институт” за помощь в создании экспериментальной установки.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Государственного задания НИЦ “Курчатовский институт” 123182, Москва, Россия.

**Конфликт интересов.** Автор данной работы заявляет об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Takahashi D., Hubner J.P.* // *Exp Mech.* 2010. V. 50. № 3. P. 365. <https://www.doi.org/10.1007/s11340-009-9232-y>
2. *Zhao T., Le V.T., Goo N.S.* // *J. Mech. Sci. Technol.* 2020. V. 34. № 4. P. 1655. <https://www.doi.org/10.1007/s12206-020-0328-8>
3. *Karpagaraj A.* *Optical Methods in Stress Measurement. // Applications and Techniques for Experimental Stress Analysis.* / Ed. Balaji P.S. IGI Global. 2020. P. 102. ISBN: 9781799816904. <https://www.doi.org/10.4018/978-1-7998-1690-4>
4. *Baek T.H., Kim M.S.* *Speckle Interferometry for Displacement Measurement and Hybrid Stress Analysis.* // *Interferometry – Research and Applications in Science and Technology.* / Ed. Pavlov I. Elsevier, 2012. P. 149. ISBN 978-953-51-0403-2. <https://www.doi.org/10.5772/2635>
5. *Kim H.J., Ji S., Han J.Y., Cho H.B., Park Y.-G., Choi D., Cho H., Park J.-U., Im W.B.* // *NPG Asia Materials.* 2022. V. 14. P. 26. <https://doi.org/10.1038/s41427-022-00374-8>
6. *Ahn S.Y., Timilsina S., Shin H.G., Lee J.H., Kim S.-H., Sohn K.-S., Kwon Y.N., Lee K.H., Kim J.S.* // *iScience.* 2023. V. 26. Iss. 1. P. 105758. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105758>
7. *Wu Y., Gan J., Wu X.* // *J. Mater. Res. Technol.* 2021. V. 13. P. 1230. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.035>
8. *Fujio Y., Xu Ch.-N., Sakata Y., Ueno N., Terasaki N.* // *J. Alloys Compd.* 2020. V. 832. P. 154900. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154900>
9. *Banishev A.F., Banishev A.A.* // *Int. J. Modern Phys. B.* 2019. V. 33. № 30. P. 1950367. <https://www.doi.org/10.1142/S02179792195036614>
10. *Wang Ch., Peng D., Pan C.* // *Sci. Bull.* 2020. V. 65. № 14. P. 1147. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.03.034>
11. *Zhang J.-Ch., Wang X., Marriott G., Xu Ch.-N.* // *Prog. Mater. Sci.* 2019. V. 103. P. 678. <https://www.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.02.001>
12. *Wang X., Peng D., Huang B., Pan C., Wang Zh.L.* // *Nano Energy.* 2019. V. 55. P. 389. <https://www.doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.11.014>
13. *Liu L., Xu Ch.-N., Yoshida A., Tu D., Ueno N., Kainuma Sh.* // *Adv. Mater. Technol.* 2018. V. 4. Iss. 1. P. 1800336. <https://www.doi.org/10.1002/admt.201800336>
14. *Feng A., Smet P.F.* // *Materials.* 2018. V. 11. № 484. P. 1. <https://www.doi.org/10.3390/ma11040484>
15. *Банишев А.Ф.* // *Письма в ЖТФ.* 2021. Т. 47. № 11. С. 33. <https://www.doi.org/10.21883/PJTF.2021.11.51005.18739>
16. *Банишев А.Ф.* // *Поверхность. Рентген. синхротр. и нейтрон. исслед.* 2022. Т. 3. С. 50. <https://www.doi.org/10.31857/S1028096022030049>
17. *Sun H., Zhao Y., Wang Ch., Zhou K., Yan Ch., Zheng G., Huang J., Dai K., Liu Ch., Shen Ch.* // *Nano Energy.* 2020. V. 76. P. 105035. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105035>
18. *Azad A.I., Rahimi M.R., Yun G.J.* // *Smart Mater. Struct.* 2016. V. 25. P. 095032. <https://www.doi.org/10.1088/0964-1726/25/9/095032>
19. *Terasaki N., Yamada H., Xu Ch.-N.* // *Catalysis Today.* 2013. V. 201. P. 203. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2012.04.040>
20. *Chandra B.P., Chandra V.K., Piyush Jha.* // *Physica B: Cond. Matter.* 2015. V. 463. P. 62. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2015.01.030>
21. *Bünzli J.-C.G., Wong K.-L.* // *J. Rare Earths.* 2018. V. 36. № 1. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2017.09.005>
22. *Xiong P., Peng M., Yang Zh.* // *iScience.* 2021. V. 24. P. 101944. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101944>
23. *Dorenbos P.* // *Journal of The Electrochemical Society.* 2005. V. 152(7). P. H107-H110. <https://doi.org/10.1149/1.1926652>

24. Katsumata T., Toyomane S., Sakai R., Komuro S., Morikawa T. // *J. Am. Ceram. Soc.* 2006. V. 89 (3). P. 932–936.  
<https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2005.00856.x>
25. Kim J.S., Koh H.J., Lee W.D., Shin N., Kim J.G., Lee K.H., Sohn K.S. // *Met Mater. Int.* 2008. V. 14. P. 165.  
<https://www.doi.org/10.3365/met.mat.2008.04.16>
26. Timilsina S., Lee K.H., Jang I.Y., Kim J.S. // *Acta Materialia*. 2013. V. 61. № 19. P. 7197.  
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.08.024>
27. Timilsina S., Lee K.H., Kwon Y.N., Kim J.S. // *J. Am. Ceram. Soc.* 2015. V. 98. № 7. P. 1.  
<https://doi.org/10.1111/jace.13566>
28. Nao Terasaki, Nao Ando, Kei Hyodo. // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2022. V. 61. P. SE1009–SE1006.  
<https://doi.org/10.35848/1347-4065/ac5069>
29. Ha Jun Kim, Sangyoon Ji, Ju Yeon Han, Han Bin Cho, Young-Geun Park, Dongwhi Choi, Hoonsung Cho, Jang-Ung Park, Won Bin Im. // *NPG Asia Materials*. 2022. 14:26. P. 1–12.  
<https://doi.org/10.1038/s41427-022-00374-8>

## Mechanoluminescence and Optically Stimulated Antistokes Luminescence of Composites Based on Epoxy Resin and Strontium Aluminate Phosphors $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ and $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$

A. F. Banishev\*

*National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia*

*\*e-mail: banishev@mail.ru*

Composite mechanoluminescent materials (composites) based on epoxy resin transparent in the visible range of spectrum and fine-dispersed powders of mechanoluminescent phosphors  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  and  $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  were obtained. The mechanoluminescence and photoluminescence spectra of composites under the combined influence of short-wave ( $\lambda = 405 \text{ nm}$ ) and long-wave ( $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ ) laser radiation were studied. The attenuation of optically stimulated antistokes luminescence of the composite under the influence of a sequence of pulses of longwave laser radiation was investigated. The composite was pre-irradiated with shortwave laser radiation. The obtained composite was used to visualize heat propagation and thermal deformations in metal plates arising under the action of powerful laser pulses and distribution of deformations under mechanical impact. For this purpose, a thin layer of the composite was applied to the surface of the materials under study. The composite had good adhesion to the surface of the materials and a high yield of mechanoluminescence, which allowed to visualize the distribution of temperature and surface deformations with a good spatial and temporal resolution.

**Keywords:** laser exposure, phosphors, composite, stress, deformation, photoluminescence, mechanoluminescence, visualization of deformations, destruction of materials.