

## О возможности получения лазерной генерации в люминофорах с аномально большим стоксовым сдвигом

Е. В. Парфенова<sup>+</sup>, Н. В. Слюсаренко<sup>+1)</sup>, Д. М. Ежов\*, О. В. Шабанова<sup>×</sup>, К. А. Шайхутдинов<sup>×</sup>,  
Е. А. Слюсарева<sup>+</sup>

<sup>+</sup> Сибирский федеральный университет, 660041 Красноярск, Россия

\*Томский государственный университет, 634050 Томск, Россия

<sup>×</sup>Красноярский научный центр Сибирского отделения РАН, 660036 Красноярск, Россия

Поступила в редакцию 26 июня 2026 г.

После переработки 8 июля 2026 г.

Принята к публикации 8 июля 2026 г.

Исследованы спектральные и фотофизические свойства двух бесцветных соединений 2-(1,3-бензотиазол-2-ил)-бромфенола и N-[2-(4-оксо-3,4-дигидрохиназолин-2-ил)фенил]нафталин-2-сульфонамида, имеющих аномально большой стоксов сдвиг люминесценции. В 2-(1,3-бензотиазол-2-ил)-бромфеноле продемонстрирована возможность получения лазерной генерации с потенциально широкой перестройкой спектральной полосы в зелено-желтой области спектра при накачке третьей гармоникой Nd:YAG-лазера.

DOI: 10.7868/S3034576626080130

**1. Введение.** Среди многообразия органических люминофоров выделяют отдельный класс бесцветных соединений с аномально большим стоксовым сдвигом люминесценции ( $8000\text{--}10000\text{ см}^{-1}$ ) [1]. Формирование цветной полосы люминесценции в таких соединениях происходит за счет внутримолекулярного переноса протона в возбужденном состоянии (ВППВС), который приводит к их фототаутомеризации [2] за время порядка нескольких пикосекунд [3]. В результате испускания таутомера наблюдается излучение, существенно отстроенное от полосы поглощения, что сводит к нулю перепоглощение собственной люминесценции.

Бесцветные люминофоры с ВППВС оказываются востребованными во флуоресцентном зондировании и мечении [4], внутриклеточной визуализации [5]. Отличительным свойством люминофоров с ВППВС является повышение эффективности люминесценции при помещении в твердую матрицу [6]. В зависимости от структуры соединений, усиление испускания объясняется единичными или комбинированными эффектами ограничения вращения групп в молекулах, оптимизацией структуры молекулы, снижением диффузии экситонов и образованием J-агрегатов [7]. Это открывает возможности использования люминофоров в фотонных устройствах, таких как кон-

центраторы солнечной энергии [8], светодиоды [9], лазерные среды [10].

Использование люминофоров с ВППВС в лазерных средах возможно благодаря формированию четырехуровневой системы накачки с реализацией необходимой инверсной населенности за счет фотоцикла с участием нормальной и таутомерной форм люминофоров [11]. По сравнению с классическими ксантеновыми красителями, которые используют для создания лазерных сред, люминофоры с ВППВС обладают рядом преимуществ: они обеспечивают более широкую полосу перестройки частоты лазерного излучения, фотостабильны [2], а также могут быть использованы для создания микролазеров с модами шепчущей галереи [12].

Целью исследования было выявление возможности получения лазерной генерации в люминофорах: 2-(1,3-бензотиазол-2-ил)-бромфенол и N-[2-(4-оксо-3,4-дигидрохиназолин-2-ил)фенил]нафталин-2-сульфонамид (в литературе также называется Орлом Белый 520Т [13]). Эти соединения объединяет способность к образованию внутримолекулярной водородной связи  $\text{N-H}\cdots\text{O}$  и  $\text{N-H}\cdots\text{N}$  в фотовозбужденных состояниях. Мы впервые синтезировали твердые растворы этих соединений в полиметилметакрилате, чтобы произвести сравнение их свойств со свойствами жидких растворов и раскрыть возможный потенциал данных люминофоров в приложениях фотоники.

<sup>1)</sup>e-mail: sci\_box@mail.ru

## 2. Материалы и методы.

**2.1. Материалы.** В работе использовались бесцветные органические люминофоры: 2-(1,3-бензотиазол-2-ил)-бромфенол (Люминофор 1) и N-[2-(4-оксо-3,4-дигидрохиназолин-2-ил)фенил]нафталин-2-сульфонамид (Люминофор 2), структурные формулы которых представлены на рис.1. Порошки люминофоров предоставлены фирмой ООО “ОЛБО” (Россия). В качестве растворителя для приготовления жидких растворов использован метилметакрилат, ММА, (ООО “Вита-Реактив”, Россия) без удаления ингибиторов. Концентрация люминофоров в растворе составляла  $1.4 \cdot 10^{-3}$  и  $1.8 \cdot 10^{-3}$  М для Люминофора 1 и Люминофора 2 соответственно.

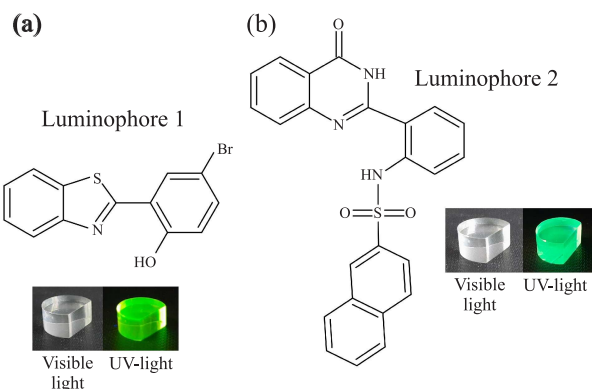


Рис.1. (Цветной онлайн) Структурные формулы и фотографии образцов 2-(1,3-бензотиазол-2-ил)-бромфенола (a) и N-[2-(4-оксо-3,4-дигидрохиназолин-2-ил)фенил]нафталин-2-сульфонамида (b)

**2.2. Синтез твердых образцов.** Твердые образцы были получены методом полимеризации ММА [14]. Порошки люминофоров растворяли в ММА, так, чтобы получить не менее пяти растворов для каждого люминофора в диапазоне концентраций от  $1 \cdot 10^{-3}$  до  $2 \cdot 10^{-2}$  М. В качестве инициатора полимеризации применялся 2,2'-азобис(2-метилпроионитрил) (ООО “Кемикал Лайн”, Россия) в количестве 0.03 г на 5 мл ММА. После добавления инициатора полимеризации, пробирки герметично закрывали и выдерживали при температуре 40 °С от 48 до 60 ч (в зависимости от количества добавляемого люминофора) до полного затвердевания органического стекла. Максимально достижимая концентрация люминофоров в полиметилметакрилате (ПММА), технологически обеспечивающая твердые прозрачные образцы составила  $2 \cdot 10^{-2}$  М и  $1.4 \cdot 10^{-2}$  М для Люминофора 1 и 2 соответственно. Из них выпиливались усеченные по боковой грани цилиндры. Диаметр и высота каж-

дого цилиндра составляли 10 и 6 мм соответственно, а сечение представляло собой прямоугольник размером 6 × 11 мм (рис.1). После этого проводилась ручная полировка торцов и плоской грани образцов. Концентрация люминофора в готовых образцах была подтверждена спектрофотометрическим методом с использованием закона Бугера–Ламберта–Бера.

**2.3. Спектрально-люминесцентные измерения.** Спектры поглощения люминофоров в твердой матрице измерялись на спектрофотометре Lambda 35 (Perkin Elmer, США).

Спектры возбуждения и люминесценции жидких и твердых образцов получены на спектрофлуориметре Fluorolog 3-22 (Horiba Scientific, США). Измерение спектров люминесценции происходило на длине волны возбуждения 355 нм для образцов в ПММА. Для Люминофора 1 и Люминофора 2 в ММА длины волн возбуждения 375 и 365 нм соответственно. Спектры возбуждения измерялись в максимуме спектров люминесценции. Запись спектров твердых образцов производилась с плоской передней поверхности. Для измерения спектров жидких растворов использовалась стандартная кварцевая кювета сечением 1 × 1 см и L-геометрия измерения. Спектры были скорректированы на спектральную чувствительность ФЭУ.

Спады интенсивности люминесценции получены на том же спектрофлуориметре, оснащенном модулем DeltaHub (Horiba Scientific, США), работающем в режиме счета одиночных фотонов. Образцы возбуждались импульсным лазерным диодом NanoLED N-370 с максимумом на длине волны 373 нм. Кинетику затухания люминесценции снимали в максимумах спектров. Анализ полученных данных, включая процедуру деконволюции, проводили в программе DAS6 (Horiba Scientific, США) с использованием статистического критерия  $\chi^2$ . Спады интенсивности люминесценции во времени описывались суммой двух или трех экспонент, и среднее время жизни люминесценции  $\tau_{pl}$  рассчитывалось с учетом соответствующих вкладов каждой из компонент спада.

Квантовый выход люминесценции ( $\varphi$ ) измерен абсолютным методом, измерения проводились с использованием интегрирующей сферы FLS-QY спектрофлуориметра OmniFluo960SP (Zolix Instruments, КНР).

**2.4. Теоретический расчет порога генерации.** Для оценки пороговой мощности накачки использовалась следующая формула [15]

$$P = \frac{8\pi c_0^2 h \tilde{\nu}_p \tilde{\nu}^2}{ng(\tilde{\nu})\sigma} \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R}, \quad (1)$$

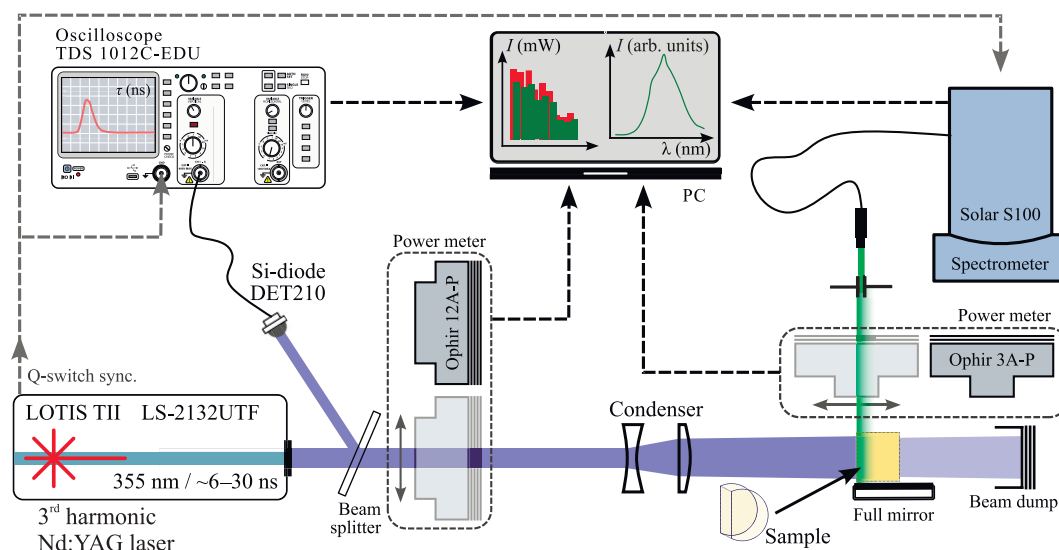


Рис. 2. (Цветной онлайн) Схема экспериментальной установки для регистрации спектральных и энергетических характеристик образцов в однопроходном режиме генерации

где  $c_0$  – скорость света в вакууме,  $h$  – постоянная Планка,  $\tilde{\nu}$  и  $\tilde{\nu}_p$  – волновые числа поглощаемого и испускаемого излучения,  $L$  – длина образца,  $R$  – коэффициент отражения на каждом окне резонатора,  $n$  – концентрация люминофора,  $\sigma$  – экспериментальное значение сечения поглощения люминофора на длине волны возбуждения,  $g(\tilde{\nu})$  – форма контура люминесценции такая, что  $\int g(\tilde{\nu}) d\tilde{\nu} = 1$ . В формуле (1) учтено отсутствие перекрытия спектров поглощения и люминесценции люминофоров.

**2.5. Генерационные свойства.** Для исследования образцов был использован экспериментальный стенд (рис. 2). Генерационные свойства образцов исследовались при поперечной накачке, в схеме однопроходной генерации, когда к одному торцу образца подставляется глухое зеркало, а вместо выходного зеркала используется второй отполированный торец образца. Длина резонатора равнялась толщине образцов  $\sim 6$  мм.

В качестве источника возбуждающего излучения использовался Nd:YAG лазер LS-2132 UTF (Lotis TII, Республика Беларусь), настроенный на вывод излучения третьей гармоники (355 нм). Для обеспечения однородного возбуждения исследуемых образцов, исходный лазерный пучок корректировался с помощью кварцевого конденсора.

Спектральные характеристики генерируемого излучения регистрировались с помощью широкополосного спектрометра S100 (Solar, Республика Беларусь). Энергетические характеристики излучения накачки и генерации регистрировались с помощью двух калориметрических измерите-

лей мощности 12A-P и 3A-P (Ophir, Государство Израиль), последний устанавливался вплотную к исследуемому образцу. Для контроля длительности импульса возбуждающего излучения накачки использовался фотодиод DET 210 (Thorlabs, США) и осциллограф TDS 1012C-EDU (Tektronix, США).

**3. Результаты и их обсуждение.** На рисунке 3 представлены спектры возбуждения и люминесценции люминофоров в жидкой среде ММА и твердой матрице ПММА. Данные максимумов спектров поглощения, возбуждения, люминесценции, а также величины стоксовых сдвигов приведены в табл. 1. Для люминофоров в жидкой среде ММА и твердой матрице ПММА отмечался аномально большой стоксов сдвиг более  $8000 \text{ см}^{-1}$  (табл. 1). Наличие аномально большого стоксова сдвига у исследованных молекул (рис. 1) обусловлено реализацией механизма ВППВС, характерного для молекул с внутримолекулярной водородной связью между протонодонорной и протоноакцепторной группами [16]. Полосу люминесценции с большим стоксовым сдвигом относят к люминесценции таутомерной формы люминофоров.

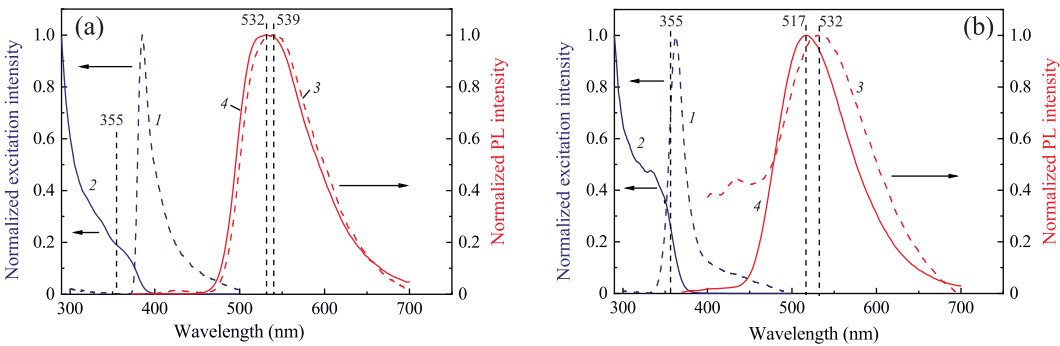
При переходе от жидкости к твердой матрице происходят существенные изменения формы спектров возбуждения двух люминофоров, а также гипсохромный сдвиг спектра люминесценции на 7 и 15 нм для Люминофора 1 и Люминофора 2 соответственно. Для Люминофора 2 подобный синий сдвиг обнаружен в работе [17] и связан с его способностью находиться в разных полиморфных состояниях.

В полимерной матрице обнаружено увеличение временен жизни люминесценции в шесть раз для Лю-

**Таблица 1.** Спектральные, фотофизические параметры, а также пороговые значения плотности потока мощности излучения накачки, для люминофоров в жидкой среде ММА и твердой матрице ПММА

| Параметр                                    | ММА                              |                                  | ПММА                             |                                  |
|---------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|                                             | Luminophore 1                    | Luminophore 2                    | Luminophore 1                    | Luminophore 2                    |
| $\lambda_{ex}$ , nm                         | 384                              | 365                              | 371                              | 350                              |
| $\lambda_{pl}$ , nm                         | 539                              | 532                              | 532                              | 517                              |
| Stokes shift, $\text{cm}^{-1}$              | 8600                             | 8157                             | 9229                             | 8600                             |
| $\tau_{pl}$ , ns                            | 0.4<br>( $\chi^2 = 1.33$ )       | 2.3<br>( $\chi^2 = 1.08$ )       | 3.09<br>( $\chi^2 = 1.05$ )      | 5.90<br>( $\chi^2 = 1.10$ )      |
| $\varphi$ , %                               | $3.0 \pm 1.0$                    | $3.0 \pm 1.0$                    | $30.0 \pm 1.7$                   | $40.8 \pm 2.4$                   |
| $\sigma$ , $\text{cm}^2$                    | $3.3 \cdot 10^{-18}$<br>(375 nm) | $7.8 \cdot 10^{-19}$<br>(365 nm) | $1.1 \cdot 10^{-18}$<br>(355 nm) | $3.3 \cdot 10^{-19}$<br>(355 nm) |
| $P$ , $\text{MW}/\text{cm}^2$<br>( $n$ , M) | –                                | –                                | 0.61<br>( $2 \cdot 10^{-2}$ )    | 2.39<br>( $1.4 \cdot 10^{-2}$ )  |

$\lambda_{ex}$  – длина волны длинноволнового пика в спектре возбуждения, определенная методом второй производной.  
 $\lambda_{pl}$  – длина волны максимума спектра люминесценции.



**Рис. 3.** (Цветной онлайн) (а) – Спектры возбуждения и люминесценции Люминофора 1 и (б) – Люминофора 2 в жидкой среде ММА и твердой матрице ПММА. Спектры поглощения (1, 2) и люминесценции (3, 4) в ММА и ПММА соответственно

минофора 1 и почти в два раза для Люминофора 2 по сравнению с жидким раствором (табл. 1).

При внедрении Люминофоров в полимерную матрицу отмечено увеличение квантового выхода люминесценции более чем на порядок по сравнению с жидким раствором ММА (табл. 1). В литературе эффект усиления люминесценции подобных соединений при в внедрении в полимерную матрицу объясняется тем, что матрица ограничивает вращательное движение молекул [18].

С учетом полученных спектральных свойств люминофоров, можно предположить следующий цикл фотопроцессов, определяющих возможность получения лазерной генерации:

1. поглощение энергии накачки ( $N \rightarrow N^*$ ) на длине волны 355 нм;
2. ВППВС ( $N^* \rightarrow T^*$ );
3. лазерная генерация ( $T^* \rightarrow T$ ) в полосе люминесценции;
4. внутримолекулярный перенос протона в основное состояние ( $T \rightarrow N$ ).

По формуле (1) были рассчитаны пороговые значения плотности потока мощности накачки  $P$  (табл. 1). Для этого были использованы значения из табл. 1, длина волны накачки 355 нм, коэффициент отражения на зеркалах 0.997, длина образца 10 мм. Для расчета использовались данные по положению максимумов и форме измеренных контуров люминесценции люминофоров в ММА и ПММА. Расчет показал, что пороговые значения  $P$  составляют величину порядка единицы  $\text{МВт}/\text{см}^2$ , но отличаются для двух люминофоров в несколько раз. Подобные высокие значения обусловлены главным образом низким значением сечения поглощения исследованных люминофоров ( $\sim 10^{-18} \text{ см}^2$ ), в то время как для лазерных красителей эта величина составляет  $\sim 10^{-16} \text{ см}^2$  [15].

Исследования лазерной генерации проводились в режиме одиночных импульсов, при которых пиковая интенсивность излучения регулировать в диапазоне от 17 до 34  $\text{МВт}/\text{см}^2$ . Для Люминофора 1 было зарегистрировано сужение линий излучения, говорящее о переходе в режим лазерной генерации начиная с

пиковой интенсивности  $17.8 \text{ МВт/см}^2$ , что на порядок выше оцененного нами значения (рис. 4). На рисунке 4 (вставка) показано изменение ширины контура излучения на полувысоте в зависимости от энергии накачки. С увеличением энергии накачки спектр сужается и ширина контура на полувысоте меняется с 80 до 10 нм, одновременно происходит увеличение интенсивности излучения. Зафиксированное КПД излучения составило около 1%. По сравнению с работой [18], где в качестве активной среды также использовался люминофор на основе ВППВС в ПММА, нам удалось получить большую степень сужения линии (в 9.8 раз по сравнению с 2.7 раза) и добротность (53.2 по сравнению с 15.0).

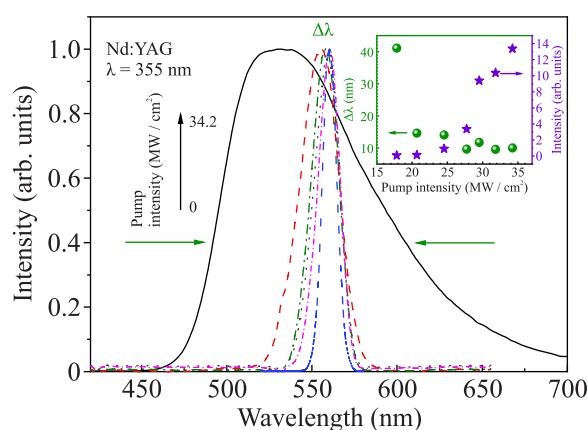


Рис. 4. (Цветной онлайн) Спектры генерации в зависимости от пиковой интенсивности накачки Люминофора 1 в полиметилметакрилате. Вставка: изменение ширины на полувысоте и интегральной интенсивности контура фотолюминесценции в зависимости от пиковой интенсивности накачки. Концентрация Люминофора 1 в ПММА  $1.07 \cdot 10^{-2} \text{ М}$

Для Люминофора 2 в ПММА аналогичных эффектов, говорящих о переходе в режим генерации, достичь не удалось. Причиной этого может быть еще более низкое значение сечения поглощения на длине волны возбуждения у Люминофора 2 по сравнению с Люминофором 1 ( $\sim 10^{-19} \text{ см}^2$ , табл. 1).

Низкое сечение поглощения в УФ области, где происходит накачка, является фундаментальным ограничением этого класса соединений, однако и в этой спектральной области оно может варьироваться в пределах порядка. Как было показано в нашей работе на примере двух соединений, это накладывает строгие требования к подбору накачивающего лазера. Имеющийся в арсенале экспериментаторов набор лазеров (с длинами волны 337, 339, 351 нм и др.) предоставляет возможность попадания в

оптимальный спектральный диапазон и понижения порога накачки.

Помимо оптимизации длины волны возбуждения, снижение порога накачки в подобных средах может быть достигнуто путем:

1. замещения тяжелых атомов на более легкие в молекуле люминофора; переход на триплетные уровни может быть вероятен в Люминофоре 1 из-за наличия в его составе атома брома с высоким значением константы спин-орбитального взаимодействия  $2450 \text{ см}^{-1}$  [19];
2. понижения температуры активной среды, что способствует повышению эффективности ВППВС [20];
3. оптимизации процедуры иммобилизации люминофора в матрице и самой матрицы [11];
4. оптимизации резонатора.

Необходимо отметить, что в ходе проведенных экспериментов, даже для образцов с максимальной концентрацией люминофоров ( $2 \cdot 10^{-2} \text{ М}$  и  $1.4 \cdot 10^{-2} \text{ М}$ , соответственно) не наблюдалось как видимых повреждений поверхности передней грани образцов, так и снижения интенсивности генерации даже после воздействия импульсов накачки с максимальной интенсивностью  $\sim 34.2 \text{ МВт/см}^2$ .

**4. Заключение.** Впервые экспериментально получены и исследованы спектрально-люминесцентные характеристики бесцветных органических люминофоров 2-(1,3-бензотиазол-2-ил)-бромфенола и N-[2-(4-оксо-3,4-дигидрохиназолин-2-ил)фенил]нафталин-2-сульфонамида в полиметилметакрилате. Иммобилизация в твердой матрице позволила сохранить люминесценцию в желто-зеленой области спектра и повысить величину квантового выхода до 40% за счет ограничения подвижности молекул. У образца с люминофором 2-(1,3-бензотиазол-2-ил)-бромфенолом было зарегистрировано сужение линии испускания при накачке третьей гармоникой Nd:YAG-лазера начиная с пиковой интенсивности  $17.8 \text{ МВт/см}^2$ , говорящее о переходе в режим лазерной генерации с зафиксированным КПД  $\sim 1\%$ .

Полученные результаты показывают принципиальную возможность применения люминофоров с аномально большим стоксовым сдвигом в полиметилметакрилате для создания активных сред лазеров с широкой перестройкой частоты при оптимизации условий синтеза и подборе оптимальных параметров накачки.

Авторы признательны Б. М. Болотину и С. В. Кулагину за предоставление образцов люмино-

форов, В. А. Светличному за полезное обсуждение результатов.

**Финансирование работы.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда # 26-12-00361, <https://rscf.ru/project/26-12-00361/>.

**Конфликт интересов.** Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. F.S. Santos, E. Ramasamy, V. Ramamurthy, and F.S. Rodembusch, "Confinement effect on the photophysics of ESIPT fluorophores", *J. Mater. Chem. C* **4**, 2820 (2016).
2. T. Stoerkler, T. Pariat, A.D. Laurent, D. Jacquemin, G. Ulrich, and J. Massue, "Excited-state intramolecular proton transfer dyes with dual-state emission properties: concept, examples and applications", *Molecules* **27**, 2443 (2022).
3. В.И. Томин, "К оценке вероятности внутреннего переноса протона из высших возбужденных состояний", *Оптика и спектроскопия* **108**, 756 (2010) [V.I. Tomin, "On estimating probability of excited state intramolecular proton transfer", *Opt. Spectrosc.* **108**, 714 (2010)].
4. H. Gu, W. Wang, W. Wu, M. Wang, Y. Liu, Y. Jiao, F. Wang, F. Wang, and X. Chen, "Excited-state intramolecular proton transfer (ESIPT)-based fluorescent probes for biomarker detection: design, mechanism, and application", *Chem. Commun.* **59**, 2056 (2023).
5. Z. Gao, Y. Hao, M. Zheng, and Y. Chen, "A fluorescent dye with large Stokes shift and high stability: synthesis and application to live cell imaging", *RSC Adv.* **7**, 7604 (2017).
6. V.S. Padalkar and S. Seki, "Excited-state intramolecular proton-transfer (ESIPT)-inspired solid state emitters", *Chem. Soc. Rev.* **45**, 169 (2016).
7. R. Hu, S. Li, Y. Zeng, J. Chen, S. Wang, Y. Li, and G. Yang, "Understanding the aggregation induced emission enhancement for a compound with excited state intramolecular proton transfer character", *Phys. Chem. Chem. Phys.* **13**, 2044 (2011).
8. S. Mattiello, A. Sanzone, F. Bruni, M. Gandini, V. Pinchetti, A. Monguzzi, I. Facchinetti, R. Ruffo, F. Meinardi, G. Mattioli, M. Sassi, S. Brovelli, and L. Beverina, "Chemically sustainable large stokes shift derivatives for high-performance large-area transparent luminescent solar concentrators", *Joule* **4**, 1988 (2020).
9. E.S. Moraes, L.G. Teixeira Alves Duarte, J.C. Germino, and T.D.Z. Atvars, "Near attack conformation as strategy for ESIPT modulation for white-light generation", *J. Phys. Chem. C* **124**, 22406 (2020).
10. H. Roohi, "Recent advancements over the past four years in ESIPT-based organic lasers", *Dyes and Pigments* **239**, 112721 (2025).
11. C.-C. Yan, X.-D. Wang, and L.-S. Liao, "Organic lasers harnessing excited state intramolecular proton transfer process", *ACS Photonics* **7**, 1355 (2020).
12. G.-Q. Wei, Y. Yu, M.-P. Zhu, X.-D. Wang, and L.-S. Liao, "Organic single-crystalline whispering-gallery mode microlasers with efficient optical gain activated via excited state intramolecular proton transfer luminogens", *J. Mater. Chem. C* **8**, 11916 (2020).
13. Б.М. Болотин, Я.А. Михлина, С.А. Архипова, Л.Г. Кузьмина, "Рентгеноструктурное исследование кристаллов органического люминофора "Орлюм Белый 520Т", *Кристаллография* **57**, 295 (2012) [B.M. Bolotin, Ya. A. Mikhlina, S. A. Arkhipova, and L. G. Kuz'mina, "X-ray diffraction study of crystals of the organic luminophore Orlyum White 520T", *Crystallogr. Rep.* **57**, 246 (2012)].
14. В.А. Светличный, И.Н. Лапин, Е.А. Вайтулевич, А.А. Бирюков, "Люминесцентные солнечные концентраторы. I. Концентраторы на основе смесей органических красителей в ПММА. Спектрально-люминесцентные свойства, реабсорбция и перенос энергии", *Изв. вузов. Физика* **56**, 100 (2013) [V.A. Svetlichnyi, I. N. Lapin, E. A. Vaitulevich, and A. A. Biryukov, "Luminescent solar concentrators. I. Concentrators based on mixtures of dyes in PMMA. Spectral and luminescent properties, reabsorption and energy transfer", *Russ Phys J.* **56**, 225 (2013)].
15. Ф.П. Шефер, *Лазеры на красителях* (Мир, М., 1976) [F.P. Schäfer (editor), *Dye Lasers* (Springer-Verlag, Berlin, 1973)].
16. Е.В. Парфенова, Н.В. Слюсаренко, С.В. Кулагин, А.В. Рогова, Ф.Н. Томилин, Е.А. Слюсарева, "Фотофизические свойства люминофоров на основе 3-(1,3-бензотиазол-2-ил)-4-гидроксibenзолсульфокислоты", *Изв. РАН. Сер. физ.* **88**, 960 (2024) [E. V. Parfenova, N. V. Slyusarenko, S. V. Kulagin, A. V. Rogova, F. N. Tomilin, and E. A. Slyusareva, "Photophysical properties of phosphors based on 3-(1,3-benzothiazol-2-yl)-4-hydroxybenzenesulfonic acid", *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **88**, 960 (2024)].
17. Б.М. Ужинов, М.Н. Химич, "Конформационные эффекты в реакциях внутримолекулярного фотопереноса протона органических соединений", *Успехи химии* **80**, 580 (2011) [B. M. Uzhinov and M. N. Khimich, "Conformational effects in excited state intramolecular proton transfer of organic compounds", *Russ. Chem. Rev.* **80**, 553 (2011)].
18. J. Massue, A. Felouat, P.M. V\'erit\'e, D. Jacquemin, K. Cyprych, M. Durko, L. Sznitko, J. Mysliwiec, and G. Ulrich, "An extended excited-state intramolecular

- proton transfer (ESIPT) emitter for random lasing applications”, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **20**, 19958 (2018).
19. E. Slyusareva, M. Gerasimova, V. Slabko, N. Abuzova, A. Plotnikov, and A. Eychmuller, “Synthesis and characterization of chitosan-based polyelectrolyte complexes doped with xanthene dyes”, *Chem. Phys. Chem.* **16**, 3997 (2015).
20. S. Oncul and A. P. Demchenko, “The effects of thermal quenching on the excited-state intramolecular proton transfer reaction in 3-hydroxyflavones”, *Spectrochim. Acta Part A* **65**, 179 (2006).