

УДК 621.373.826.038.824

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ГЕНЕРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА НОВЫХ КУМАРИНОВ – ПРОИЗВОДНЫХ БЕНЗОПИРИЛИЯ

С. С. АНУФРИК¹⁾, В. В. ТАРКОВСКИЙ¹⁾, С. Н. АНУЧИН¹⁾

¹⁾Гродненский государственный университет им. Янки Купалы,
ул. Ожешко, 22, 230023, г. Гродно, Беларусь

Исследованы спектральные и генерационные параметры кумаринов – производных бензопирилия в этаноле и ацетонитриле при когерентном возбуждении. Установлено, что спектры поглощения изученных соединений содержат несколько максимумов и структурированность спектров связана с их бихромофорной структурой. Показано, что рассмотренные органические красители являются бихромофорными соединениями. Отмечено, что их спектрально-люминесцентные и генерационные свойства зависят от природы заместителей в положениях 6 и 7 кумариновой основы и положениях 6' и 7' ядра бензопирилия. Продemonстрировано, что наличие заместителей в определенных положениях кумариновой основы и ядра бензопирилия изменяет конформацию молекулы и, соответственно, дипольные моменты и силы осцилляторов перехода. Генерационная способность у кумаринов данного класса проявляется только при наличии в положении 7 наиболее сильных донорных заместителей (например, Et₂N и OH), а в положениях 6' и 7' достаточно сильных акцепторов. Получена генерация в спектральной области 730–740 нм на красителях – производных бензопирилия.

Ключевые слова: кумарины; производные бензопирилия; спектры поглощения; молекулярная структура; бихромофоры; генерационные характеристики.

Образец цитирования:

Ануфрик СС, Тарковский ВВ, Анучин СН. Спектральные и генерационные свойства новых кумаринов – производных бензопирилия. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2022;2:19–25.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2022-2-19-25>

For citation:

Anufrik SS, Tarkovsky VV, Anuchin SN. Spectral and generation properties of new coumarins – benzopyrylium derivatives. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2022;2: 19–25. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2022-2-19-25>

Авторы:

Славамир Степанович Ануфрик – доктор физико-математических наук; профессор кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета.
Викентий Викентьевич Тарковский – кандидат физико-математических наук; доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета.
Сергей Николаевич Анучин – младший научный сотрудник кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета.

Authors:

Slavamir S. Anufrik, doctor of science (physics and mathematics); professor at the department of theoretical physics and heat engineering, physico-technical faculty.
anufrik@grsu.by
Vikentiy V. Tarkovsky, PhD (physics and mathematics); associate professor at the department of theoretical physics and heat engineering, physico-technical faculty.
tarkovsky@grsu.by
Sergey N. Anuchin, junior researcher at the department of theoretical physics and heat engineering, physico-technical faculty.
anuchin_sn@grsu.by

SPECTRAL AND GENERATION PROPERTIES OF NEW COUMARINS – BENZOPYRYLIUM DERIVATIVES

S. S. ANUFRIK^a, V. V. TARKOVSKY^a, S. N. ANUCHIN^a

^a*Yanka Kupala State University of Grodno, 22 Ažėška Street, Hrodna 230023, Belarus*

Corresponding author: V. V. Tarkovsky (tarkovsky@grsu.by)

The spectral and generation parameters of coumarins, benzopyrylium derivatives, in ethanol and acetonitrile under coherent excitation were studied. It was found that the absorption spectra of the investigated compounds contain several maxima and the structuredness of the spectra is associated with their bichromophoric structure. It is shown that these organic dyes are bichromophoric compounds. It is noted that the nature of the substituents in positions 6 and 7 of the coumarin base and positions 6' and 7' of the benzopyrylium core determines their spectral-luminescent and lasing properties. It is demonstrated that the presence of substituents in certain positions of the coumarin base and the benzopyrylium core changes the conformation of the molecule and, accordingly, the dipole moments and oscillator strengths of the transition. The generation ability of coumarins of this class manifests itself only in the presence of the strongest donor substituents (for example, Et₃N and OH) in position 7, and sufficiently strong acceptors in positions 6' and 7'. Lasing was obtained in the spectral region of 730–740 nm on dyes – benzopyrylium derivatives.

Keywords: coumarins; benzopyrylium derivatives; absorption spectra; molecular structure; bichromophores; generation characteristics.

Введение

Все спектральные, энергетические и временные характеристики излучения лазеров на красителях определяются прежде всего активной средой. В настоящее время известно более 600 различных красителей, на которых получена генерация в диапазоне от 310 до 1800 нм [1; 2]. Однако спектральный диапазон, в котором получена генерация при ламповой накачке, перекрыт эффективно генерирующими и фотоустойчивыми красителями крайне неравномерно [2]. По этой причине поиск новых эффективно генерирующих красителей, обладающих повышенной фотохимической устойчивостью и большим ресурсом работы, является актуальной задачей [3–7].

Целенаправленный поиск новых эффективных и фотостойких лазерных красителей невозможен без детального исследования основополагающих процессов, происходящих в молекулах при возбуждении и дезактивации. В связи с этим фундаментальной проблемой физики молекул органических красителей является установление закономерностей взаимосвязи их структуры, спектрально-люминесцентных, физико-химических и генерационных свойств, а также изучение особенностей их внутри- и межмолекулярных взаимодействий в растворах. Растворитель оказывает существенное влияние на квантовый выход люминесценции, спектры поглощения и люминесценции, генерационные характеристики сложных молекул. Это связано с наличием межмолекулярных взаимодействий, поскольку каждая молекула в растворе взаимодействует с молекулами окружения [8].

Решение указанных задач позволит прогнозировать и синтезировать новые высокоэффективные лазерные красители с наперед заданными параметрами, минимальными наведенными потерями и высокой фотостабильностью.

В связи с этим большой интерес представляет использование в качестве активных сред в лазерах на красителях производных кумарина [9; 10]. Это обусловлено тем, что соединения данного класса при мощной ламповой накачке обладают наилучшими энергетическими характеристиками и фотостойкостью в сине-зеленой области спектра [11], а ярко выраженная поляризация их молекулярной структуры позволяет расширить диапазон перестройки спектра генерации, используя эффекты сольватации [12; 13].

Как известно, большое влияние на спектрально-люминесцентные и генерационные характеристики лазерных красителей оказывает характер сольватного окружения [1; 8; 12; 14–16]. Эффективность флуоресценции полярных и неполярных растворов красителей определяется видом аниона [8]. В полярных растворах квантовый выход флуоресценции от вида аниона зависит несущественно. Это характерно для солевых форм красителей, в том числе и для солей пирилия. В полярных растворах происходит полная диссоциация соли красителя и в силу лабильности первого возбужденного синглетного уровня анионы не успевают диффундировать к молекуле красителя, находящейся в возбужденном состоянии [1]. Если в качестве окружения используется неполярный растворитель, то молекулы диссоциируют значительно слабее и тушащий анион остается в контакте с катионом. В конечном итоге это уменьшает квантовый выход флуоресценции. Кроме того, от типа растворителя зависит положение полос поглощения, флуоресценции и генерации [12].

Данная работа посвящена исследованию взаимосвязи спектральных и генерационных характеристик новых производных бензопирилия с их молекулярной структурой в различных растворителях.

Экспериментальная установка и методика эксперимента

Спектры поглощения исследуемых соединений измерялись на спектрофотометре Specord 200 (*Analytik Jena*, Германия), а спектры флуоресценции регистрировались на спектрофлуориметре СМ 2203 (*SOLAR*, Беларусь) при возбуждении в максимум основной полосы поглощения кумаринов. Для исследования генерационных характеристик производных бензопирилия использовался лазер на красителях (ЛК) с когерентным возбуждением (рис. 1). Источником накачки ЛК служил электроразрядный эксимерный XeCl-лазер с энергией генерации 150–200 мДж, длиной волны 308 нм и длительностью импульса 60 нс. Излучение XeCl-лазера фокусировалось цилиндрической линзой ($f = 10$ см) на кварцевую кювету размером 10×10 мм. Резонатор ЛК с базой $L = 15$ см был образован зеркалами с коэффициентами отражения $R_1 \approx 100\%$ и $R_2 \approx 30\%$. Измерение энергии генерации ЛК и контроль энергии накачки осуществлялись измерителями ИМО-2Н. Спектр широкополосной генерации регистрировался спектрографом СТЭ-1 со световодной транспортировкой излучения.

Объектами исследования являлись новые кумарины – производные бензопирилия при когерентном возбуждении в различных растворителях. Данные соединения отличаются тем, что в положении 3 кумариновой основы содержат ядро бензопирилия с определенными заместителями (рис. 2). Помимо этого, все они являются солевыми соединениями – перхлоратами.

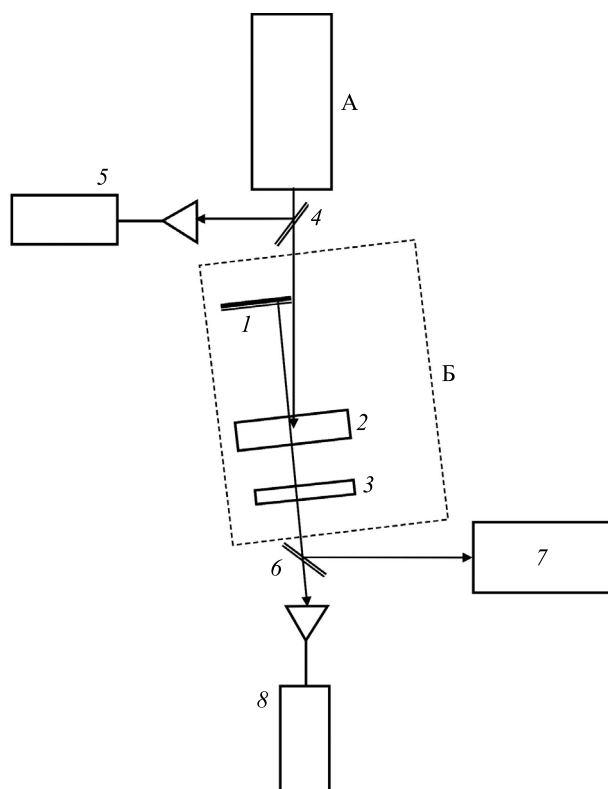


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

A – эксимерный лазер; Б – лазер на красителях; 1, 3 – зеркала резонатора;
2 – кювета с красителем; 4, 6 – поворотные пластинки; 5, 8 – измерители энергии; 7 – спектрограф

Fig. 1. Scheme of the experimental setup:

A – excimer laser; Б – dye laser; 1, 3 – resonator mirrors; 2 – dye cell;
4, 6 – rotary plates; 5, 8 – energy meters; 7 – spectrograph

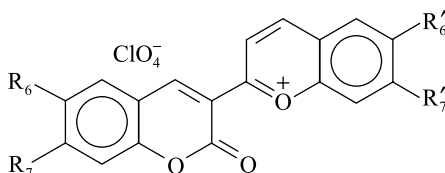


Рис. 2. Структурная формула кумаринов – производных бензопирилия:

R_6 и R'_6 – C_6H_{13} ; R_7 и R'_7 – Et_2N , OH

Fig. 2. Structural formula of coumarins – benzopyrylium derivatives:

R_6 and R'_6 – C_6H_{13} ; R_7 and R'_7 – Et_2N , OH

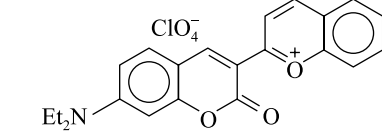
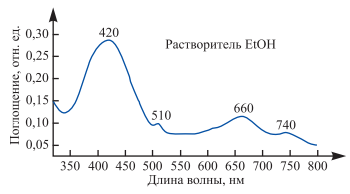
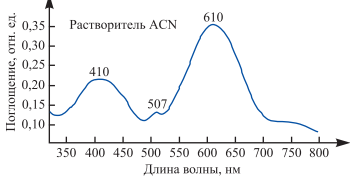
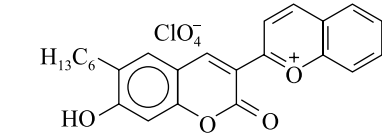
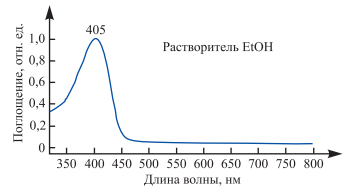
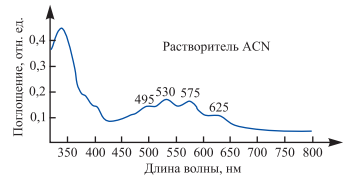
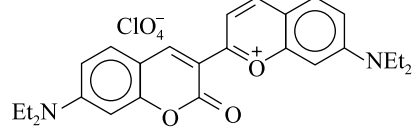
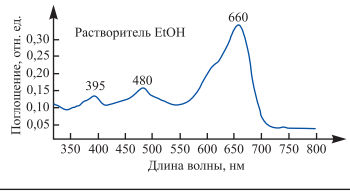
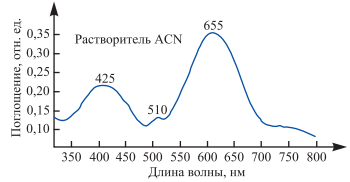
Исследованы различные виды таких кумаринов, отличающиеся заместителями в положениях 6 и 7 кумариновой основы и положениях 6' и 7' ядра бензопирилия. В качестве растворителей использовались этанол и ацетонитрил.

Результаты и их обсуждение

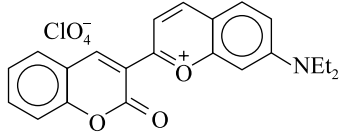
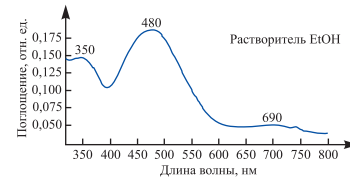
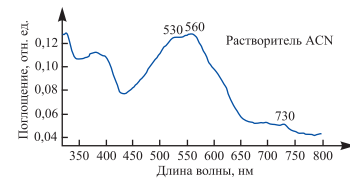
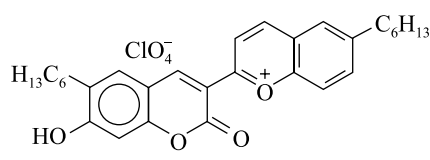
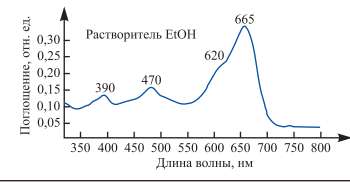
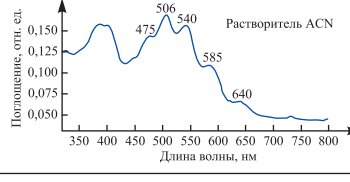
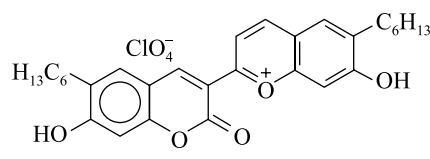
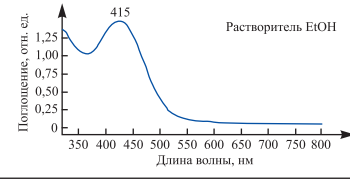

Результаты исследования производных бензопирилия представлены в таблице, где приведены название, структурная формула соединения, растворитель, спектры поглощения и максимумы флуоресценции, КПД генерации $\eta_{\text{ген}}$ и спектральный диапазон генерации $\Delta\lambda_{\text{ген}}$ (максимальная длина волны генерации).

Как видно из таблицы, спектры поглощения в этаноле и ацетонитриле не обладающего генерационной способностью соединения № 1 и хорошо генерирующего соединения № 3 отличаются. Наличие у соединения № 3 диэтиламиногруппы в положении 7' ядра бензопирилия привело к существенному различию структуры и положения главных и побочных максимумов в спектрах поглощения.

Спектральные и генерационные характеристики производных бензопирилия
Spectral and generation characteristics of benzopyrylium derivatives

№ п/п	Соединение	Спектр поглощения и растворитель	$\lambda_{\text{макс флуор}}$, нм	$\eta_{\text{ген}}$, %	$\Delta\lambda_{\text{ген}} (\lambda_{\text{макс ген}})$, нм
1	 7-Диэтиламино-3-(бензопирилий-2)-кумарин перхлорат		494 700 815 сл.	Не генерирует	—
			488 700	Не генерирует	—
2	 7-Гидрокси-6-гексил-3-(бензопирилий-2)-кумарин перхлорат		465	Не генерирует	—
			—	Не генерирует	—
3	 7-Диэтиламино-3-(7-диэтиламинобензопирилий-2)-кумарин перхлорат		700	3,0	715–730
			701 450 сл.	12,6	730–740

Окончание таблицы
Ending table

№ п/п	Соединение	Спектр поглощения и растворитель	$\lambda_{\text{макс флуор}}$, нм	$\eta_{\text{ген}}$, %	$\Delta\lambda_{\text{ген}}$ ($\lambda_{\text{макс}}$), нм
4	 3-(7-Диэтиламинобензопирилий-2)-кумарин перхлорат		—	Не генерирует	—
			—	Не генерирует	—
5	 7-Гидрокси-6-гексил-3-(6-гексилбензопирилий-2)-кумарин перхлорат		820 сл.	Порог	725
			664	0,8	608–630
6	 7-Гидрокси-6-гексил-3-(7-гидрокси-6-гексилбензопирилий-2)-кумарин перхлорат		590 сл. 780 сл.	Порог	600
			805 сл.	0,8	555–567 600

Примечание. Обозначение интенсивности: сл. – слабая.

В этаноле главный максимум поглощения соединения № 1 расположен в области 420 нм, а побочные максимумы – в области 510; 660 и 740 нм. Для соединения № 3 в этаноле ситуация прямо противоположная: главный максимум соответствует 660 нм, а побочные максимумы расположены в области 395 и 480 нм.

В ацетонитриле главный максимум поглощения соединения № 1 соответствует 610 нм, а максимум в области 410 нм существенно меньше по интенсивности. Аналогичная трансформация спектра поглощения в ацетонитриле наблюдается и для соединения № 3. Наличие двух широких максимумов поглощения в синей и красной областях спектра подтверждает бихромоформную структуру данных соединений, которая отражается и на спектрах флуоресценции. Однако, несмотря на схожесть спектров поглощения, генерационной способностью обладает только соединение № 3, излучающее в дальней красной области спектра (730–740 нм) с достаточно высоким КПД (12,6 %).

Для соединения № 2, содержащего в структуре кумариновой основы гидроксильную (—ОН (R_7)) и гексильную (— C_6H_{13} (R_6)) группы, спектр поглощения в этаноле имеет один главный максимум с длиной волны 405 нм. В ацетонитриле данный максимум сдвигается в коротковолновую область (360 нм) и возникает широкая структурированная полоса поглощения в области 495–625 нм меньшей интенсивности. Это соединение не генерирует и слабо флуоресцирует в области 465 нм.

Для соединения № 4, по сравнению с соединением № 3, характерно отсутствие диэтиламиногруппы в положении 7 кумариновой основы. Это привело к уширению и существенному коротковолновому

сдвигу полос поглощения (~180 нм в этаноле и ~100 нм в ацетонитриле) (см. таблицу) и флуоресценции (~100 нм). Данное соединение не обладает флуоресцентной и генерационной способностью. Вероятно, отсутствие Et_2N -группы в положении 7 кумариновой основы не обеспечивает формирование единой цепи π -электронного сопряжения между кумариновым и бензопирановым фрагментами. Это подтверждают наблюдаемое большое гипсохромное смещение спектров поглощения, отсутствие флуоресценции и, соответственно, генерации соединения № 4.

Для соединений № 5 и 6, содержащих в структуре кумариновой основы и ядра бензопирилия гексильные группы в положениях 6 и 6' и гидроксильную группу в положении 7, вид спектров поглощения в этаноле и ацетонитриле также существенно различается (см. таблицу). У соединения № 5 в этаноле главный максимум спектра поглощения соответствует 665 нм, а побочные максимумы меньшей интенсивности расположены в области 470 и 390 нм. В ацетонитриле происходят уширение, резкая структуризация и коротковолновый сдвиг главного максимума поглощения и флуоресценции на ~160 нм. При этом существенно возрастает по интенсивности максимум поглощения в области 380 нм. Соединение генерирует излучение вблизи порога в области 720 нм (этанол) и в области 608–627 нм (ацетонитрил).

У соединения № 6 наличие гидроксильной группы в положении 7' ядра бензопирилия привело к трансформации и появлению только одного главного максимума (415 нм) в этанольном спектре поглощения. В ацетонитриле, как и у соединения № 5, наблюдаются уширение и структурирование спектров поглощения и флуоресценции. Основной структурированный максимум поглощения находится в области 500 нм, а более узкий коротковолновый максимум – в области 360 нм. Спектр генерации соединения расположен в зеленой области (555–560 нм).

Анализ приведенных в таблице результатов показывает следующее:

- спектры поглощения практически всех исследованных соединений содержат несколько полос (максимумов);
- структурированность спектров поглощения в большей степени проявляется в ацетонитриле, все спектры поглощения являются уширенными и содержат главный максимум и побочные максимумы меньшей интенсивности;
- спектры поглощения исследованных соединений расположены в диапазоне 350–750 нм, а спектры флуоресценции – в диапазоне 500–800 нм, как правило, они содержат несколько максимумов.

Уширение спектров поглощения и флуоресценции, вероятно, обусловлено сложной бихромоформной структурой рассмотренных соединений, включающих кумариновую основу и ядро бензопирилия, а также электронодонорные и электроноакцепторные заместители в положениях 6, 7 и 6', 7'.

Сравнительный анализ химической структуры исследованных кумаринов показывает, что на их спектрально-люминесцентные характеристики и генерационную способность в основном оказывают влияние три фактора: природа заместителей в положениях 6 и 7 кумаринового кольца, природа заместителей в ядре бензопирилия и тип растворителя. На примере негенерирующих соединений № 1, 2 и 4 (см. таблицу) прослеживается важная роль заместителей в положениях 6 и 7 кумариновой основы, а на примере соединений № 3, 5 и 6 – в положениях 6' и 7' ядра бензопирилия. Наличие электронодонорных заместителей в положении 7 кумариновой основы и незамещенного в положениях 6' и 7' ядра бензопирилия либо отсутствие только электронодонорных заместителей в положении 7 приводит к потере генерационной способности. И наоборот, наличие электронодонорных заместителей в положении 6 или 7 кумариновой основы и заместителей — Et_2N и — OH в положении 7' ядра бензопирилия приводит к появлению генерации излучения.

Как видно из данных таблицы, наибольшей генерационной эффективностью обладают соединения, у которых в положении 7 кумариновой основы и положении 7' ядра бензопирилия находится Et_2N -группа. Меньшим КПД генерации характеризуются соединения, содержащие в положении 7 кумариновой основы и положении 7' ядра бензопирилия OH -группу. Наличие гексильной группы в положениях 6 и 6' не оказывает существенного влияния на генерационную способность исследованных соединений.

Более высокий КПД генерации в ацетонитриле объясняется тем, что он является n -донорным растворителем, обладающим несвязывающими неподеленными парами n -электронов и, следовательно, основными свойствами.

Закключение

Исследованы спектрально-люминесцентные и генерационные свойства кумаринов – производных бензопирилия в этаноле и ацетонитриле. Показано, что спектры поглощения рассмотренных соединений содержат несколько максимумов и структурированность спектров связана с их бихромоформной структурой.

На спектрально-люминесцентные характеристики и генерационную эффективность кумаринов – производных бензопирилия в основном оказывают влияние три фактора: природа заместителей в положениях 6 и 7 кумаринового кольца, природа заместителей в ядре бензопирилия и тип растворителя.

Генерационная способность у кумаринов данного класса проявляется только при наличии в положении 7 наиболее сильных донорных заместителей (например, Et_2N и OH), а в положениях 6' и 7' достаточно сильных акцепторов.

В условиях когерентной наносекундной накачки получена генерация в спектральной области 715–740 нм на красителях – бензопирилиевых производных кумарина.

Библиографические ссылки

1. Степанов БИ, редактор. *Каталог активных лазерных сред на основе растворов органических красителей и родственных соединений*. Минск: Институт физики АН БССР; 1977. 239 с.
2. Brackmann U. *Lambdachrome laser dyes*. 3rd edition. Goettingen: Lambda Physik; 2000. 294 p.
3. Земский ВИ, Колесников ЮЛ, Мешковский ИК. *Физика и техника импульсных лазеров на красителях*. Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО; 2005. 176 с. (Выдающиеся ученые ИТМО).
4. Ануфрик СС, Тарковский ВВ. Производные 3-(2-бензимидазолил) кумарина – высокоэффективные лазерные среды. *Журнал прикладной спектроскопии*. 2010;77(5):695–703.
5. Ануфрик СС, Тарковский ВВ, Сазонко ГГ, Асимов ММ. Новые лазерные красители на основе производных 3-имидазопиридил кумарина. *Журнал прикладной спектроскопии*. 2012;79(1):53–59.
6. Ануфрик СС, Анучин СН, Тарковский ВВ. Структура, генерационные характеристики и фотостабильность новых гетерилкумаринов. *Оптика и спектроскопия*. 2020;128(12):1889–1897. DOI: 10.21883/OS.2020.12.50326.127-20.
7. Копылова ТН, Майер ГВ, Резниченко АВ, Самсонова ЛГ, Светличный ВА, Долотов СМ и др. Твердотельные активные среды на основе аминкумаринов. *Квантовая электроника*. 2003;33(6):498–502.
8. Шеффер ФП, редактор. *Лазеры на красителях*. Деркачева ЛД, редактор перевода. Москва: Мир; 1976. 329 с.
9. Маслов ВВ, Дзюбенко МИ, Коваленко СИ, Никитченко ВМ, Новиков АИ. Новые эффективные красители для красной области спектра генерации. *Квантовая электроника*. 1987;14(8):1576–1581.
10. Snively BB, Peterson OG, Reithel RF, inventors; Eastman Kodak Co., assignee. Laser media containing coumarin dye solutions. United States patent US 3,521,187. 1970 July 21.
11. Masilamani V, Chandrasekar V, Sivaram BM, Sivasankar B, Natarajan S. Simultaneous dual band laser emission from two conformations of DAMC. *Optics Communications*. 1986;59(3):203–207. DOI: 10.1016/0030-4018(86)90285-3.
12. Маслов ВВ, Дзюбенко МИ, Никитченко ВМ. Влияние растворителя на спектральные и генерационные характеристики лазерных иминокумариновых красителей. *Квантовая электроника*. 1989;16(4):709–714.
13. Дзюбенко МИ, Маслов ВВ, Науменко ИГ, Пелипенко ВП. Эффективная генерация в зеленой области спектра на красителях нового класса. *Оптика и спектроскопия*. 1980;49(4):764–768.
14. Lapouyade R, Kuhn A, Letard J-F, Rettig W. Multiple relaxation pathways in photoexcited dimethylaminonitro- and dimethylaminocyno-stilbenes. *Chemical Physics Letters*. 1993;208(1–2):48–58. DOI: 10.1016/0009-2614(93)80075-Z.
15. Maslov VV, Nikitchenko VM. Dual-band lasing of benzopyran dyes in the red region of the spectrum. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2006;73(3):454–457. DOI: 10.1007/s10812-006-0099-8.
16. Райхардт К. *Растворители и эффекты среды в органической химии*. Москва: Мир; 1991. 763 с.

References

1. Stepanov BI, editor. *Katalog aktivnykh lazernykh sred na osnove rastvorov organicheskikh krasitelei i rodstvennykh soedinenii* [Catalog of active laser media based on solutions of organic dyes and related compounds]. Minsk: Institute of Physics of the Academy of Sciences of the BSSR; 1977. 239 p. Russian.
2. Brackmann U. *Lambdachrome laser dyes*. 3rd edition. Goettingen: Lambda Physik; 2000. 294 p.
3. Zemsky VI, Kolesnikov YL, Meshkovsky IK. *Fizika i tekhnika impul'snykh lazerov na krasitelyakh* [Physics and technology of pulsed dye lasers]. Saint Petersburg: ITMO University; 2005. 176 p. (Vydayushchiesya uchenye ITMO). Russian.
4. Anufrik SS, Tarkovsky VV. Coumarin 3-(2-benzimidazolyl) derivatives – highly effective laser media. *Zhurnal prikladnoy spektroskopii*. 2010;77(5):695–703. Russian.
5. Anufrik SS, Tarkovsky VV, Sazonko GG, Asimov MM. [New laser dyes based on 3-imidazopyridylcoumarin derivatives]. *Zhurnal prikladnoy spektroskopii*. 2012;79(1):53–59. Russian.
6. Anufrik SS, Anuchin SN, Tarkovsky VV. [Structure, generation characteristics and photostability of new heterocoumarins]. *Optika i spektroskopiya*. 2020;128(12):1889–1897. Russian. DOI: 10.21883/OS.2020.12.50326.127-20.
7. Kopylova TN, Mayer GW, Reznichenko AV, Samsonova LG, Svetlichny VA, Dolotov SM, et al. [Solid state active media based on aminocoumarins]. *Kvantovaya elektronika*. 2003;33(6):498–502. Russian.
8. Schafer FP, editor. *Dye Lasers*. Berlin: Springer-Verlag; 1973. 285 p. (Applied physics; volume 1).
Russian edition: Schafer FP, editor. *Lazery na krasitelyakh*. Derkacheva LD, translation editor. Moscow: Mir; 1976. 329 p.
9. Maslov VV, Dzyubenko MI, Kovalenko SI, Nikitchenko VM, Novikov AI. [New efficient dyes for the red part of the lasing spectrum]. *Kvantovaya elektronika*. 1987;14(8):1576–1581. Russian.
10. Snively BB, Peterson OG, Reithel RF, inventors; Eastman Kodak Co., assignee. Laser media containing coumarin dye solutions. United States patent US 3,521,187. 1970 July 21.
11. Masilamani V, Chandrasekar V, Sivaram BM, Sivasankar B, Natarajan S. Simultaneous dual band laser emission from two conformations of DAMC. *Optics Communications*. 1986;59(3):203–207. DOI: 10.1016/0030-4018(86)90285-3.
12. Maslov VV, Dzyubenko MI, Nikitchenko VM. [Influence of the solvent on the spectral and lasing characteristics of laser iminocoumarin dyes]. *Kvantovaya elektronika*. 1989;16(4):709–714. Russian.
13. Dzyubenko MI, Maslov VV, Naumenko IG, Pelipenko VP. [Efficient generation in the green region of the spectrum on dyes of a new class]. *Optika i spektroskopiya*. 1980;49(4):764–768. Russian.
14. Lapouyade R, Kuhn A, Letard J-F, Rettig W. Multiple relaxation pathways in photoexcited dimethylaminonitro- and dimethylaminocyno-stilbenes. *Chemical Physics Letters*. 1993;208(1–2):48–58. DOI: 10.1016/0009-2614(93)80075-Z.
15. Maslov VV, Nikitchenko VM. Dual-band lasing of benzopyran dyes in the red region of the spectrum. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2006;73(3):454–457. DOI: 10.1007/s10812-006-0099-8.
16. Reichart K. *Rastvoriteli i efekty sredy v organicheskoi khimii* [Solvents and environmental effects in organic chemistry]. Moscow: Mir; 1991. 763 p. Russian.

Получена 05.04.2022 / исправлена 22.04.2022 / принята 22.04.2022.
Received 05.04.2022 / revised 22.04.2022 / accepted 22.04.2022.