

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П. Н. Лебедева
Российской академии наук

На правах рукописи

Бурдукова Ольга Александровна

**Лазеры на красителях видимого спектрального
диапазона с полупроводниковой накачкой**

Специальность 01.04.05 — Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2020

Работа выполнена в Физическом институте имени П. Н. Лебедева РАН (ФИАН).

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент
Петухов Владимир Андреевич

Официальные оппоненты: **Палто Сергей Петрович**,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное учреждение
«Федеральный научно-исследовательский
центр «Кристаллография и фотоника»
Российской академии наук, Институт кри-
сталлографии им. А.В. Шубникова (ИК
РАН),
главный научный сотрудник

Галаган Борис Иванович,
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Федеральный исследова-
тельский центр «Институт общей физики
им. А.М. Прохорова Российской академии
наук» (ИОФ РАН),
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт спектроскопии
Российской академии наук (ИСАН)

Защита состоится «08» февраля 2021 г. в 11:00 часов на заседании
диссертационного совета Д 002.023.03 на базе Физического института
им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, а также на сайте
института www.lebedev.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2020 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.023.03,

доктор физико-математических наук

Золотько Александр Степанович

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена разработке и исследованию эффективных перестраиваемых лазеров на красителях видимого диапазона (500 – 700 нм) с короткими импульсами ($10^{-7} - 10^{-10}$ с) и накачкой полупроводниковыми лазерными диодами.

Актуальность темы. На сегодняшний день актуальной является задача создания эффективного, малогабаритного, перестраиваемого по длине волны лазерного источника коротких и ультракоротких импульсов (УКИ) в диапазоне 500–700 нм. Этот диапазон видимого спектра крайне востребован в таких приложениях, как лазерная спектроскопия [1; 2], офтальмология [3; 4], дерматология [5], разделение изотопов [6; 7], лазерное охлаждение [8; 9], конфокальная микроскопия [10] и в других областях. В желто–зеленом диапазоне спектра на данный момент доступны отдельные линии лазерных источников [11]: 568 нм (криптоновый лазер), 578 нм (лазер на парах меди) и 543 нм, 552 нм, 556 нм, 561 нм, 569–582 нм, 577 нм, 588 нм, 589 нм, 593 нм, 604 нм, 607 нм (твердотельные лазеры с диодной накачкой — DPSS [12–16]). В случаях, когда требуются другие длины волн или же плавная перестройка в этом диапазоне, источниками излучения могут быть лазеры на красителях (ЛК). В качестве альтернативы ЛК можно рассматривать параметрические генераторы [17]. Однако, высокая стоимость параметрических генераторов во многом ограничивает их применения. Таким образом, существует потребность в более простых и дешевых лазерах на красителях с короткими и ультракороткими импульсами видимого диапазона спектра 500–700 нм с возможностью широкой перестройки длины волны генерации в этом спектральном диапазоне.

К настоящему моменту существенная доля стоимости лазеров на красителях приходится на систему накачки, поэтому замена традиционных источников возбуждения красителей на полупроводниковые лазеры позволит реализовать низкое энергопотребление и компактность ЛК, а также значительно снизить их стоимость.

Работы, посвященные использованию лазерных диодов для накачки лазеров на красителях, появлялись в течение многих лет, однако эффективность таких лазеров была крайне низкой [18–25]. В этих работах КПД либо не превышал 2 %, либо вовсе не измерялся. Появление синих (445 нм) лазерных диодов с мощностью около 1,7 Вт в непрерывном режиме привело к значительному прогрессу в диодной накачке ЛК: к 2015 году в работе [26] удалось достичь 8,8 % КПД для полимерного ЛК. Стоит отметить, что в работе [26] накачка ЛК осуществлялась короткими импульсами излучения (длительностью 100 нс) двух таких диодов с превышением их максимально допустимого тока на порядок. В 2013 году фирма Nichia выпустила мощные зеленые лазерные диоды ($\lambda = 520$ нм, $P = 1$ Вт), что дало возможность значительно продвинуться в работах по диодной накачке перестраиваемых

лазеров. Исследования, посвященные полупроводниковой накачке такими диодами лазеров на красителях, были впервые осуществлены в 2018 году нашей группой в ФИАНе. С каждым годом мощность лазерных диодов видимого диапазона растет, кроме того, эти лазеры коммерчески доступны и недороги (~ 100 \$ за один диод). В связи с этим, работы по разработке оптимальных схем накачки и резонаторов перестраиваемых лазеров на красителях, а также по отбору подходящих для диодной накачки лазерных красителей являются актуальными и на данный момент.

Целью данной работы является разработка и реализация эффективных перестраиваемых лазеров на красителях с импульсной накачкой полупроводниковыми лазерами.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Исследовать генерационные характеристики ряда впервые синтезированных красителей класса пиранов и периинденонов и отобрать наиболее подходящие для полупроводниковой накачки вещества.
2. Исследовать и экспериментально реализовать различные типы накачки и схемы резонаторов, оптимальных для полупроводниковой накачки лазеров на красителях.
3. Разработать и экспериментально реализовать импульсную накачку полупроводниковыми лазерами жидкостных и полимерных лазеров на красителях.
4. Реализовать перестройку длины волны генерации в лазерах на красителях с полупроводниковой накачкой и исследовать их генерационные характеристики.
5. Экспериментально осуществить режим синхронизации продольных мод в лазере на красителях с полупроводниковой накачкой.

Научная новизна:

1. Измерены генерационные характеристики для растворов 37 новых лазерных красителей класса периинденонов и пиранов. Лучшие из исследованных веществ не уступают по эффективности генерации и спектральному диапазону перестройки широко используемым красителям.
2. Предложен и впервые реализован импульсный перестраиваемый лазер на красителях с поперечной накачкой полупроводниковыми лазерами ($\lambda = 445$ нм) в трехзеркальной схеме резонатора с полным внутренним отражением и частичной компенсацией астигматизма.
3. Впервые реализованы импульсные перестраиваемые лазеры на растворах красителей и на красителях в полимерных матрицах с квазипродольной накачкой полупроводниковыми лазерами ($\lambda = 513$ нм) в трехзеркальной схеме резонатора.

4. Впервые продемонстрирован режим синхронизации продольных мод в импульсном перестраиваемом лазере на красителях при синхронной накачке полупроводниковыми лазерами.

Практическая значимость данной диссертации заключается в разработке и создании эффективных перестраиваемых лазеров на красителях, накачиваемых полупроводниковыми лазерами. Это является необходимым шагом на пути к созданию недорогих, компактных и эффективных лазерных источников, позволяющих осуществлять перестройку длины волны генерации в желто-зеленой области спектра (500–700 нм) и получать ультракороткие импульсы.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Среди недавно синтезированных соединений класса пионов и периинденонов найдены новые красители, обеспечивающие эффективную лазерную генерацию в оранжевой и красной областях спектра.
2. Жидкостный и полимерный лазеры на красителях видимого спектрального диапазона, реализованные по схемам с квазипродольной накачкой полупроводниковыми лазерами, обладают высоким КПД (в десятки процентов) и широкой областью перестройки (более шестидесяти нанометров).
3. Схема трехзеркального резонатора с компенсацией астигматизма и полным внутренним отражением генерируемого излучения в кювете с раствором красителя позволяет получить в лазере на красителях перестраиваемую в широком диапазоне (500–700 нм) генерацию при поперечном возбуждении активной среды полупроводниковыми лазерами.
4. Использование полупроводниковых лазеров видимого диапазона для возбуждения лазера на красителе позволяет осуществить режим синхронизации продольных мод и получить субнаносекундные импульсы. Продемонстрированная длительность импульсов при синхронной диодной накачке с использованием пассивного затвора составляет около 100 пс.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались автором на 12 международных и 4 всероссийских конференциях, школах конференций и семинарах:

1. «Синхронизация продольных мод в лазере на красителях с диодной накачкой», О.А. Бурдукова, В.А. Петухов, М.А. Семенов, 62-я Всероссийская научная конференция МФТИ с международным участием, 18 ноября 2019 г., Москва, Россия.
2. «Mode locking of diode-pumped dye laser», O. Burdukova, M. Gorbunkov, V. Petukhov, M. Semenov, International Conference on Ultrafast Optical Science (UltrafastLight-2019), 30 сентября – 4 октября 2019 г., Москва, Россия.

3. «Полимерный лазер на красителях с накачкой 520 нм лазерными диодами», О.А. Бурдукова, С.М. Долотов, В.А. Петухов, М.А. Семенов, Международная научная конференция по фотонике и информационной оптике, 24 января 2019 г., Москва, Россия.
4. «High-efficiency tunable dye lasers pumped by visible diodes», O. Burdukova, V. Petukhov, M. Semenov, The Fifth MIPT–UEC–LPI International Workshop on Atomic, Molecular and Optical Physics, 1–3 октября 2018 г., Москва, Россия.
5. «Tunable dye lasers pumped by visible diodes», O. Burdukova, V. Petukhov, M. Semenov, First International Conference on Optics, Photonics and Lasers (OPAL 2018), 9–11 мая 2018 г., Барселона, Испания.
6. «Перестраиваемый лазер на красителях с квазипродольной диодной накачкой», О.А. Бурдукова, В.А. Петухов, М.А. Семенов, VII международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», 17 апрель 2018 г., Москва, Россия.
7. «Квазипродольная накачка лазера на красителях зелеными лазерными диодами», О.А. Бурдукова, В.А. Петухов, М.А. Семенов, Международная научная конференция по фотонике и информационной оптике, 25 января 2018 г., Москва, Россия.
8. «Квазипродольная накачка лазера на красителях зелеными полупроводниковыми лазерами», О.А. Бурдукова, В.А. Петухов, М.А. Семенов, 60-я Всероссийская научная конференция МФТИ с международным участием, 23 ноября 2017 г., Москва, Россия.
9. «Лазер на красителе с накачкой полупроводниковыми лазерами», О.А. Бурдукова, М.В. Горбунков, В.А. Петухов, М.А. Семенов, VI международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», 17 апрель 2017 г., Москва, Россия.
10. «Полупроводниковая накачка лазеров на красителях», О.А. Бурдукова, В.А. Петухов, М.А. Семёнов, 59-я Всероссийская научная конференция МФТИ с международным участием, 24 ноября 2016 г., Москва, Россия.
11. «Tunable diode-pumped dye laser», O. Burdukova, M. Gorbunkov, V. Petukhov, V. Povedailo, M. Semenov, The International Conference on Coherent and Nonlinear Optics/ International Conference on Lasers, Applications and Technologies (ICONO/LAT 2016), 27 сентября 2016 г., Минск, Беларусь.
12. «New efficient laser dyes for the red region. Periindenones», S. Belov, O. Burdukova, I. Komlev, V. Petukhov, V. Povedailo, M. Semenov, The International Conference on Coherent and Nonlinear Optics/

- International Conference on Lasers, Applications and Technologies (ICONO/LAT 2016), 27 сентября 2016 г., Минск, Беларусь.
13. «Лазер на красителе с полупроводниковой накачкой», О.А. Бурдукова, В.А. Петухов, М.А. Семёнов, V международная молодежная научная школа–конференция «Современные проблемы физики и технологий», 21 апреля 2016 г., Москва, Россия.
 14. «Лазерные красители для полупроводниковой накачки», О. Бурдукова, В. Петухов, М. Семёнов, Международная научная конференция по фотонике и информационной оптике, 29 января 2015 г., Москва, Россия.
 15. «Laser dyes for diode pumping», О.А. Burdukova, Second MIPT–UEC Joint Workshop on Optical Science, 16–20 октября 2014 г., Токио, Япония.
 16. «Лазерные красители для накачки полупроводниковыми лазерами», О.А. Бурдукова, В.А. Петухов, М.А. Семенов, 6 Всероссийская молодежная конференция «Фундаментальные и инновационные вопросы современной физики», 16 ноября 2015 г., Москва, Россия.

Личный вклад. Все изложенные в диссертации результаты получены автором лично, либо при его непосредственном участии.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 10 печатных изданиях, 7 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых Web of Science и Scopus, 3 — в тезисах докладов. Список публикаций приведен на стр. 19–20.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 122 страницы, включая 50 рисунков и 13 таблиц. Список литературы содержит 138 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируются цели и ставятся задачи работы, излагаются научная новизна и практическая значимость представляемой работы. Кроме того, во **Введении** представлены личный вклад автора, сведения об апробации результатов работы и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору литературы по тематике диссертации. Кратко изложена история развития лазеров на красителях, начиная с первых работ 1966 года и до настоящего времени.

В *разделе 1.1* кратко описываются особенности лазеров на красителях, преимущества и недостатки ЛК как в жидкостной, так и в твердотельной формах. Проводится сравнение органических красителей

и неорганических твердотельных сред с точки зрения порогов генерации, усиления и возможностей перестройки длины волны. Указаны области применения, где лазеры на красителях практически незаменимы: спектроскопия, лазерное разделение изотопов и ряд новых применений (плазмонные нанолазеры, сенсоры для малых изменений показателя преломления биологических растворов).

В *разделе 1.2* кратко описана колебательно-вращательная структура энергетических уровней органических красителей и четырехуровневая схема генерации. Приведены основные физико-химические процессы, оказывающие негативное влияние на эффективность генерации лазерных красителей, и краткий обзор по основным источникам накачки, применяющимся в импульсных и непрерывных ЛК.

В *разделе 1.3* дан обзор литературы по работам, посвященным возбуждению полупроводниковыми лазерными диодами лазеров на красителях и других перестраиваемых лазеров на кристаллах $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Cr}^{+3}:\text{LiSrAlF}_6$, $\text{Cr}^{+3}:\text{LiCaAlF}_6$, $\text{Cr}^{+3}:\text{LiSrGaF}_6$ и $\text{Cr}^{+3}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$.

Вторая глава посвящена исследованию новых эффективных лазерных красителей для красной области спектра. Описаны исследования генерационных характеристик 37 впервые синтезированных красителей класса периинденонов и пиринов с целью поиска перспективных для диодной накачки красителей.

В *разделе 2.1* описаны экспериментальные установки для исследования генерационных характеристик новых красителей. Измерения проводились в широкополосном и селективном резонаторах при накачке этанольных растворов красителей одиночными импульсами ($\tau_{\text{имп}} = 20$ нс) второй гармоники Nd:YAG лазера.

В *разделе 2.2* приведены результаты измерений генерационных характеристик для периинденонов (подраздел 2.2.1) и пиринов (подраздел 2.2.2), а именно: длины волн максимумов поглощения и генерации, диапазон перестройки, значения пороговых энергий накачки и дифференциальный КПД в широкополосном резонаторе. Проводится сравнение лазерных характеристик новых красителей с широко известными красителями (Родамин 6Ж, Родамин 101, DCM и Пиридин-1). Определены красители, обладающие диапазонами перестройки заметно превышающие 100 нм, что существенно больше перестройки родаминовых красителей. Экспериментально показано, что энергетическая эффективность лучших из исследованных веществ не уступает эффективности широко используемых красителей. Наиболее перспективными веществами с точки зрения диодной накачки являются красители, обладающие наиболее низкими порогами генерации, их характеристики приводятся в табл. 1.

В *разделе 2.3* приводятся основные выводы ко **второй главе**. Исследования генерационных характеристик показали высокую эффективность

Таблица 1 — Периинденоны, пироны и эталонные вещества.

№	Краситель	Селективный резонатор			Широкополосный резонатор	
		$\lambda_{\text{полг}}^{\text{макс}}$, нм	$\lambda_{\text{ген}}^{\text{макс}}$, нм	$\Delta\lambda$, нм	$\eta_{\text{диф}}$, %	$E_{\text{пор}}$, мДж
1	N-999	522	605	576 – 674 (98)	40,6	6,7
3	C-9	518	619	577 – 681 (104)	43,1	7,4
8	M-162	538	615	590 – 675 (85)	43,6	6,6
9	M-147	552	620	578 – 677 (99)	45,4	5,9
10	C-114	515	604	572 – 687 (115)	39,1	7,3
13	Cyclo-6	552	623	583 – 680 (97)	46,7	5,5
25	DCM-17	470	637	602 – 684 (82)	33,8	7,0
33	LDhalcon	470	638	590 – 694 (104)	35,8	7,4
21	Rh6G	530	570	550 – 618 (68)	50,9	4,9
22	Rh101	576	612	593 – 665 (72)	42,3	4,6
23	DCM	472	635	595 – 691 (96)	28,9	7,4

и широкий диапазон перестройки ряда новых красителей, часть из которых была отобрана для экспериментов по диодной накачке.

Третья глава посвящена лазеру на красителях с поперечной накачкой синими ($\lambda_{\text{нак}} = 445$ нм) полупроводниковыми лазерами.

В *разделе 3.1* приводятся основные характеристики нитрид-галлиевых (InGaN) полупроводниковых лазеров NDB7K75 фирмы Nichia, выбранных в качестве источника накачки. Питание этих диодов осуществлялось короткими импульсами тока длительностью $\tau_{\text{имп}} = 200$ нс и амплитудой до 4,0 А, что позволяло получить около $P_{\text{макс}} = 5$ Вт импульсной мощности с каждого диода. Частота следования устанавливалась $\nu_{\text{имп}} \approx 2$ Гц. Излучение линейно поляризовано: электрический вектор ориентирован в плоскости $p - n$ перехода полупроводникового лазера. Используемые диоды генерируют излучение с максимумом на $\lambda_{\text{макс}} = 445$ нм и спектральной шириной $\Delta\lambda = 1,5$ нм.

В *разделе 3.2* обсуждаются возможные схемы накачки и обосновывается выбор поперечной схемы возбуждения диодами NDB7K75. Приводятся преимущества и недостатки выбранной схемы поперечной накачки с полным внутренним отражением генерируемого излучения (см. рис. 1). Подобные схемы успешно применены при диодном возбуждении Nd:YVO₄ лазера [27] и лазера на александрите [28]. Накачка производилась через стенку кюветы в область полного внутреннего отражения генерации красителя на границе раздела кювета (плавленый кварц, $n_{\text{qz}} = 1,46$)/растворитель (бензиловый спирт, $n_{\text{ВнОН}} = 1,54$).

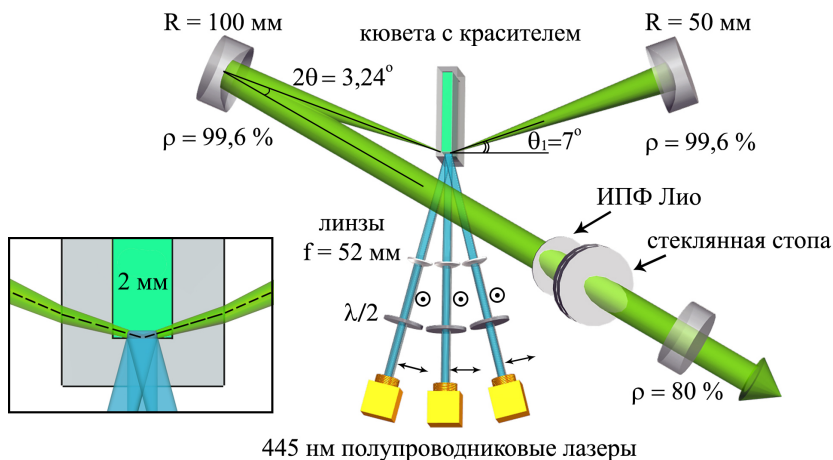


Рис. 1 — Схема перестраиваемого ЛК с поперечной накачкой синими диодами. Вставка: полное внутреннее отражение генерации в кювете с красителем (вид сверху).

В *разделе 3.3* описан эксперимент и приведены результаты по отбору красителей, обладающих наименьшими порогами генерации при накачке вспомогательным лазером на красителе кумарин 120 ($\lambda_{\text{нак}} = 453 \text{ нм}$), имитирующим излучение синего диода. Определены наиболее перспективные для накачки 445 нм диодами лазерные красители: кумарины 334 и 540А, DCM и новый краситель LDhalcon, исследованный во второй главе.

В *разделе 3.4* подробно описана схема резонатора для ЛК с поперечной диодной накачкой. Трехзеркальный резонатор с частичной компенсацией астигматизма (рис. 1) позволил эффективно использовать излучение накачки трех диодов и дал возможность проводить исследования красителей как в широкополосном, так и в селективном резонаторах. В кварцевую прямоугольную кювету с расстоянием между внутренними стенками $d = 2 \text{ мм}$ заливался раствор красителя. Концентрация красителей подбиралась таким образом, чтобы излучение накачки поглощалось на расстоянии $l \approx 20 \text{ мкм}$ по уровню I_0/e . Характерные концентрации лазерных красителей в таких условиях довольно высоки и лежат в диапазоне от $C = 3 \times 10^{-3} \text{ М/л}$ до 10^{-2} М/л , т. е. для ряда красителей уже может проявляться эффект концентрационного тушения. Излучение каждого диода, проходя через асферическую линзу и приобретая плоский фронт, попадало на полуволновую пластинку $\lambda/2$, а затем фокусировалось линзой с фокусом $f = 5,2 \text{ см}$ на кювету с красителем. Суммарная энергия накачки, поглощенной в активной среде, не превышала $E_{\text{нак}} = 2,4 \text{ мкДж}$. Использовались сферические зеркала с радиусами кривизны $R = 50 \text{ мм}$ и $R = 100 \text{ мм}$ с отражением 99,6 % («глухие»), и плоское «выходное» зеркало, частично пропускающее излучение на длине волны генерации (от

20 % до 44 %). Угол между оптической осью и передней стенкой (через которую осуществлялась накачка) составлял $\theta_1 = 7^\circ$. Угол поворота пучка, рассчитанный согласно [29], составил $2\theta \approx 3,24^\circ$. Полная оптическая длина резонатора — 45 см. Длина компенсирующего плеча, т. е. расстояние между плоским и наклонным сферическим зеркалами, $d_{\text{комп}} = 35$ см. Радиус пучка в области перетяжки по оценке составил $\omega \approx 15$ мкм. Селекция длины волны осуществлялась одноэлементным интерференционно-поляризационным фильтром (ИПФ) Лию: двулучепреломляющая пластинка из кристаллического кварца и стеклянная стопа, установленные под углом Брюстера внутри резонатора.

В разделе 3.5 приведены генерационные характеристики лазера на красителях с поперечной диодной накачкой как в широкополосном (подраздел 3.5.1), так и в селективном (подраздел 3.5.2) резонаторах. Общий достигнутый диапазон перестройки генерации (рис. 2) составил около 200 нм (от 497 нм до 699 нм). В лазере на растворах красителей кумарин 540А и DCM в бензиловом спирте получены (см. табл. 2): импульсы генерации с энергией 0,3 мкДж и длительностью около 140 нс, частота следования импульсов 2 Гц, дифференциальный КПД для широкополосного резонатора превысил 17 %, индивидуальные диапазоны перестройки составили 70 нм, КПД около 6 % (в селективном резонаторе), расходимость излучения — 0,5 мрад.

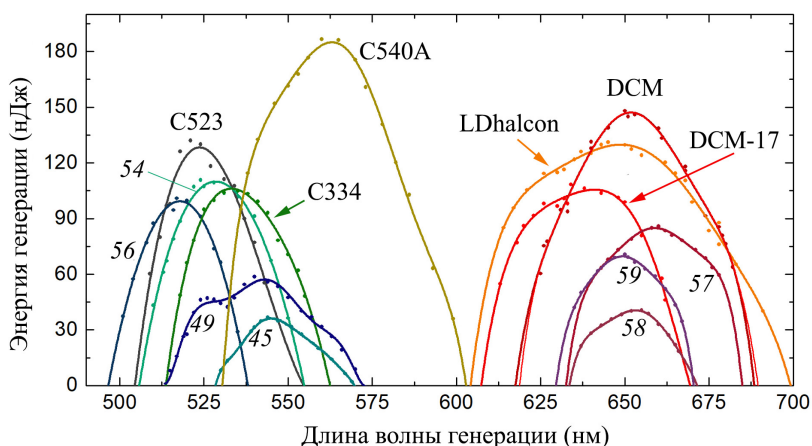


Рис. 2 — Зависимость энергии генерации от длины волны для ЛК с поперечной накачкой полупроводниковыми лазерами.

В разделе 3.6 приводятся основные выводы к **третьей главе**. Впервые получена перестройка длины волны генерации в большом диапазоне длин волн для ЛК с диодной накачкой.

Таблица 2 — Генерационные характеристики лучших красителей при поперечной диодной накачке.

№	Краситель	Селективный резонатор			Широкополосный резонатор	
		$\lambda_{\text{ген}}^{\text{макс}}$, нм	$\Delta\lambda$, нм	$\eta^{\text{макс}}$, %	$\eta_{\text{диф}}$, %	$E_{\text{пор}}$, мкДж
47	C334	533	514 – 562 (48)	4,3	10,9	0,60
48	C540A	562	532 – 603 (71)	7,6	18,0	0,63
55	C523	524	504 – 554 (50)	5,3	9,8	0,71
23	DCM	651	618 – 688 (70)	6,0	17,3	0,40
25	DCM-17	641	608 – 669 (61)	4,3	8,2	0,29
33	LDhalcon	649	605 – 699 (94)	5,3	12,5	0,51

Четвертая глава посвящена лазеру на красителях с квазипродольной накачкой зелеными ($\lambda_{\text{нак}} = 513$ нм) полупроводниковыми лазерами.

В разделе 4.1 приводятся основные характеристики нитрид-галлиевых полупроводниковых диодов NDG7475 фирмы Nichia, выбранных в качестве источника накачки. Импульсное питание этих диодов ($\tau_{\text{имп}} = 200$ нс и $I_{\text{макс}} = 4,2$ А) позволяло получать порядка $P_{\text{макс}} = 2$ Вт импульсной мощности с каждого диода. Частота следования устанавливалось $\nu_{\text{имп}} \approx 2$ Гц. Излучение линейно поляризовано в плоскости $p - n$ перехода диода. Используемые диоды генерируют излучение с максимумом на $\lambda_{\text{макс}} = 513$ нм и спектральной шириной $\delta\lambda \approx 3$ нм.

В разделе 4.2 подробно описана схема резонатора для лазера на красителях с продольной диодной накачкой. Для сведения пучков накачки от двух диодов на кювету с красителем использовалась схема с поляризационным делителем. Используя для фокусировки 18-мм просветленную асферическую линзу, была получена область накачки 20×40 мкм. В случае квазипродольной накачки был собран резонатор в конфигурации, близкой к концентрической (рисунок 3), состоящий из двух сферических зеркал ($R = 50$ мм и $R = 100$ мм, коэффициент отражения $\rho > 0,99$), плоского выходного зеркала ($0,56 \leq \rho \leq 0,87$) и стеклянной кюветы с красителем, установленной в область перетяжки под углом Брюстера к оптической оси резонатора. Оптическая длина резонатора — 45 см, толщина слоя красителя — 200 мкм. Угол падения лазерного пучка на компенсирующее астигматизм сферическое зеркало ($R = 100$ мм) составлял $13,2^\circ$. Радиус пучка для ТЕМ₀₀ моды в центре кюветы по оценкам равен 10 мкм.

В разделе 4.3 приведены генерационные характеристики лазера на красителях с продольной диодной накачкой как в широкополосном, так и в селективном резонаторах. Представлены результаты измерений КПД, порогов генерации и дифференциальных КПД в широкополосном

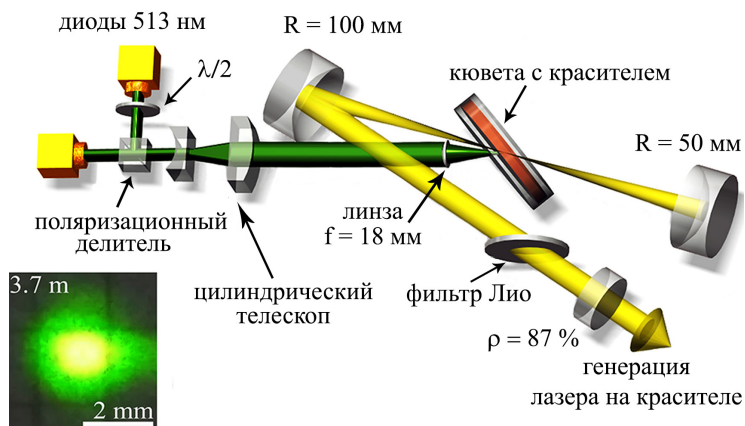


Рис. 3 — Схема перестраиваемого ЛК с продольной накачкой двумя зелеными диодами. Вставка: пространственный профиль лазерного пучка на расстоянии 3,7 м от выходного зеркала.

резонаторе, а также кривые перестройки для различных красителей класса родаминов, пиррометенов и пионов в селективном резонаторе (см. рис. 4а). Общий достигнутый диапазон перестройки генерации составил 145 нм (от 537 нм до 682 нм) с расходимостью лазерного пучка $\theta_{1/2} \approx 0,5$ мрад (рис. 4б). В лазере на красителе пиррометен 567 в этаноле получены (см. табл. 3): импульсы генерации с энергией 0,23 мкДж и длительностью около 170 нс, частота следования импульсов 2 Гц, дифференциальный КПД (широкополосный резонатор) превысил 45 %, индивидуальный диапазон перестройки составили 42 нм (от 542 нм до 584 нм), КПД более 25 % (селективный резонатор).

Таблица 3 — Генерационные характеристики лучших красителей при продольной диодной накачке.

№	Краситель	Селективный резонатор			Широкополосный резонатор	
		$\lambda_{\text{ген}}^{\text{макс}}$, нм	$\Delta\lambda$, нм	$\eta^{\text{макс}}$, %	$\eta_{\text{диф}}$, %	$E_{\text{пор}}$, мкДж
60	PM567	559	542 – 584 (42)	25,2	45,4	0,25
62	PM597	585	572 – 616 (44)	14,0	34,0	0,37
63	Rh110	547	537 – 564 (27)	16,6	26,1	0,25
21	Rh6G	578	568 – 602 (34)	15,8	35,7	0,22
23d	DCM	660	638 – 682 (44)	14,3	32,7	0,36
33b	LDhalcon	642	610 – 679 (69)	12,9	29,1	0,30

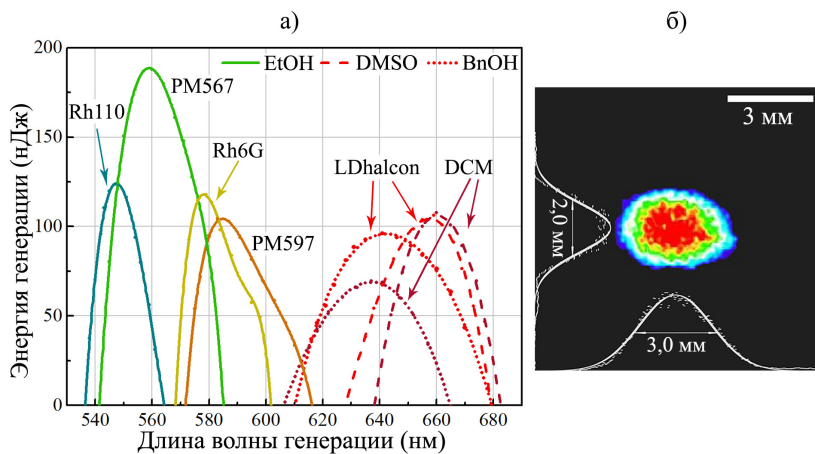


Рис. 4 — а) Кривые перестройки для ЛК с продольной накачкой полупроводниковыми лазерами. б) Пространственный профиль генерации, измеренный в фокальной плоскости линзы с $f = 5,0$ м.

В *разделе 4.4* приводятся основные выводы к **четвертой главе**. Эксперименты по накачке ЛК зелеными полупроводниковыми лазерами проводились впервые, полученные значения КПД являются рекордными для ЛК с диодной накачкой.

Пятая глава посвящена исследованию генерационных характеристик наиболее эффективных красителей в различных полимерных матрицах при возбуждении полупроводниковыми лазерными диодами NDG7475 ($\lambda_{\text{нак}} = 513$ нм). Оптическая схема накачки для полимерного лазера на красителях, как и схема резонатора, аналогичны описанным в **четвертой главе**. Активным элементом в данной главе являлся триплекс из двух стекол и полимера с лазерным красителем (толщина активного слоя 70 — 110 мкм). Накачка производилась 470 нс импульсами (рис. 5а) с частотой повторения 2 Гц. Разработка состава полимерной композиции и изготовление полимерных образцов проводились С.М. Долотовым в Российском химико-технологическом университете им. Д.И. Менделеева. Лучшие результаты были получены на красителях класса пиррометенов.

В *разделе 5.1* приведены генерационные характеристики полимерного лазера на красителях с квазипродольной диодной накачкой. Представлены результаты измерений пороговых энергий генерации, КПД, спектральных диапазонов перестройки, дифференциальных КПД и фотостойкости в широкополосном резонаторе (см. табл. 4). Кроме того, проведено сравнение кривых перестройки для трех красителей класса пиррометенов в различных полимерных составах и результатов измерений их фотостойкости с аналогичными характеристиками, измеренными для красителя родамин

6Ж (рис. 56). Указаны составы полимерных матриц, демонстрирующих наилучшую эффективность.

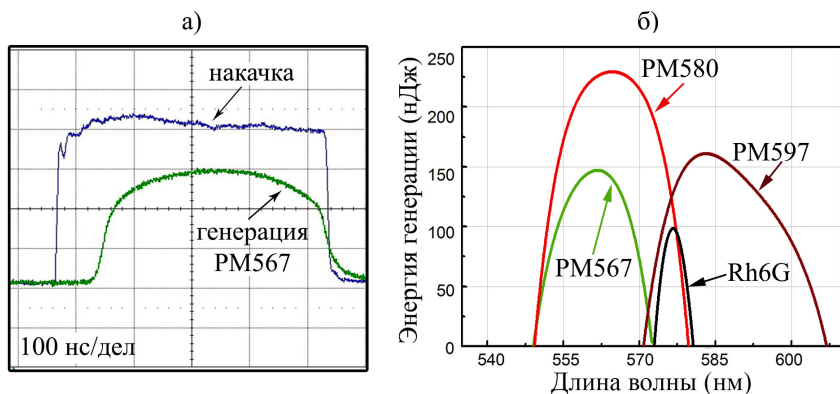


Рис. 5 — а) Осциллограммы импульсов накачки и генерации для образца PM567 в поливинилбутирале. б) Кривые перестройки полимерного ЛК с диодной накачкой.

Таблица 4 — Генерационные характеристики лучших красителей в полимерных матрицах при продольной диодной накачке.

Краситель		Селективный резонатор			Широкополосный резонатор		
		$\lambda_{\text{ген}}^{\text{макс}}$, нм	$\Delta\lambda$, нм	$\eta^{\text{макс}}$, %	$\eta_{\text{диф}}$, %	$E_{\text{пор}}$, мкДж	N, имп.
3	PM567	562	549 – 573 (24)	8,4	41,8	0,32	$1,3 \cdot 10^3$
4	PM580	565	549 – 580 (31)	13,1	41,4	0,30	$4,7 \cdot 10^3$
7	PM597	583	571 – 607 (36)	9,2	25,0	0,35	10^5
8	Rh6G	577	573 – 581 (8)	5,6	—	—	10^3

Лучшие результаты по эффективности генерации и по фотостойкости активных элементов были получены на красителях класса пиррометенов. Получена перестройка генерации в спектральном диапазоне от 545 нм до 607 нм ($\Delta\lambda = 62$ нм), а дифференциальный КПД в широкополосном резонаторе для различных полимерных матриц составил от 25 % до 42 %, что в несколько раз превышает литературные данные по эффективности для полимерных лазеров с диодной накачкой. Параметры перестраиваемого полимерного лазера на красителе пиррометен 580: длительность импульсов 380 нс, энергия генерации до 0,23 мкДж и КПД — 13 % (селективный

резонатор), дифференциальный КПД около 41 % (широкополосный резонатор), расходимость порядка 0,5 мрад, диапазон перестройки $\Delta\lambda \approx 30$ нм с максимумом на $\lambda_{\text{ген}}^{\text{макс}} = 565$ нм, фотостойкость около 5 тысяч импульсов в одну точку. Лучшую фотостойкость показал краситель пиррометен 597 в сополимере бутилметакрилата с метакриловой кислотой, для него энергия генерации падает вдвое за сто тысяч импульсов в одну и ту же точку.

В *разделе 5.2* приводятся основные выводы к **пятой главе**. Впервые была реализована перестройка длины волны генерации в полимерном лазере на красителях в широком спектральном диапазоне (от 545 нм до 607 нм), исследованные в данной диссертации полимерные ЛК по многим лазерным характеристикам превосходят известные твердотельные ЛК с диодной накачкой.

Шестая глава посвящена исследованию режима синхронизации продольных мод в лазере на красителях с накачкой полупроводниковыми лазерами. Кратко описан механизм формирования УКИ в лазерах на красителях, указаны его особенности и основные отличия от неорганических твердотельных лазерных сред. Подробно описаны эксперименты по получению ультракоротких импульсов в лазере на красителе родамин 6Ж с квазипродольной накачкой импульсами зеленых (513 нм) лазерных диодов. Приводятся результаты экспериментов как с использованием пассивной самосинхронизации мод, так и при синхронной накачке модулированным излучением полупроводниковых лазеров.

В *разделе 6.1* обсуждается выбор пары красителей для реализации режима пассивной самосинхронизации продольных мод. В качестве таких красителей выбрана широко известная пара: родамин 6Ж (активная среда, $C_{\text{Rh6G}} = 2 \cdot 10^{-3}$ М/л) и 3,3'-диэтилоксидикарбоцианин йодид (DODCI, пассивный затвор, $C_{\text{DODCI}} = 10^{-5}$ М/л).

В *разделе 6.2* описана схема резонатора для режима синхронизации мод в лазере на красителях с диодной накачкой и эксперименты по самосинхронизации мод в ЛК с диодной накачкой. Использовалась трехзеркальная схема резонатора с компенсацией астигматизма и импульсная накачка (частота 2 Гц, длительность около 400 нс) двумя зелеными ($\lambda_{\text{нак}} = 513$ нм) диодами. Пассивный затвор DODCI добавлялся в кювету с активным веществом (этанольный раствор Rh6G). Время полного обхода по резонатору для пассивной синхронизации мод в ЛК должно примерно равняться времени жизни молекул красителя на возбужденном уровне (приблизительно 4 нс для Rh6G). Длина оптического пути резонатора составила около 68 см, а пропускание выходного зеркала выбиралось от 2 % до 13 %. Параметры фокусировки излучения полупроводниковых лазеров оставались такими, как описано в **четвертой главе**. Длительность импульсов накачки ограничивалась временем появления термооптических искажений в кювете с раствором красителей. Для перестройки длины волны генерации и для уменьшения спектральной ширины генерируемого излучения

в компенсирующее плечо резонатора устанавливался либо однокомпонентный фильтр Лео, либо пара призм, либо комбинация из призм и эталона Фабри-Перо толщиной 0,33 мм. В этой схеме были получены цуги субнаносекундных импульсов генерации (несколько импульсов на аксиальном периоде, частичная синхронизация мод). Добиться стабильного режима самосинхронизации мод, используя только пассивный затвор, не удалось.

В *разделе 6.3* описаны эксперименты по синхронизации мод в ЛК с насыщающимся поглотителем и синхронной накачкой диодами. Для осуществления синхронной накачки оптическая схема лазера на красителе была модернизирована (рис. 6). Кроме прежних двух лазерных диодов, был добавлен третий. Модуляция тока для двух из 3 диодов накачки (с поляризацией излучения в тангенциальной плоскости) осуществлялась при помощи драйвера, разработанного и собранного В.А. Петуховым и М.А. Семеновым в лаборатории фотоники молекул (ФИАН). Драйвер питания имеет следующие характеристики: частота следования импульсов $\nu_{\text{имп}} = 220$ МГц, длительность импульсов $\tau_{\text{FWHM}} < 1$ нс, максимальный ток в импульсе до $I_{\text{имп}}^{\text{макс}} \approx 8$ А. Частота модуляции диодов задавалась при помощи генератора частот Г4–151, а задержка между импульсами диодов с модуляцией регулировалась независимо при помощи двух генераторов импульсов Г5–78. В результате лазер на красителе стал генерировать цуги ультракоротких импульсов с отличной повторяемостью (рис. 7). Более точные измерения длительности лазерного импульса, проводившиеся с помощью высокоскоростной стрик-камеры АГАТ-СФ показали, что в ЛК с диодной накачкой генерируются цуги (140 нс) ультракоротких импульсов длительностью менее $\tau_{\text{имп}} < 100$ пс.

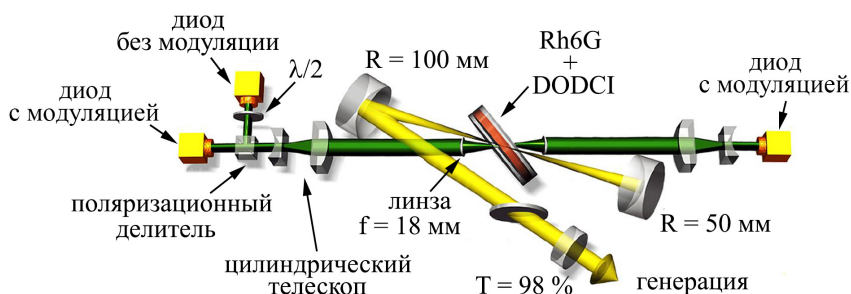


Рис. 6 — Схема ЛК с синхронной накачкой зелеными диодами.

В *разделе 6.4* приводятся основные выводы к шестой главе. Впервые реализован режим синхронизации продольных мод в лазере на красителях с накачкой полупроводниковыми лазерами и получены ультракороткие импульсы. При использовании насыщающегося поглотителя DODCI в кювете с активной средой Rh6G, а также при накачке 2 диодами с модуляцией тока ($I_{\text{имп}}^{\text{макс}} \approx 8$ А, $\tau_{\text{имп}} < 1$ нс, $\nu_{\text{имп}} \approx 220$ МГц) и одним диодом

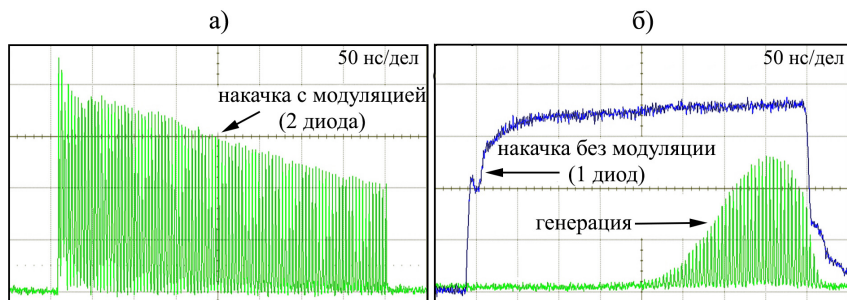


Рис. 7 — а) Осциллограмма импульсов накачки для 2 диодов с модуляцией тока ($\tau_{\text{имп}} = 1$ нс, $\nu = 220$ МГц); б) Временной профиль генерации ЛК и импульса накачки диода без модуляции.

без модуляции ($I_{\text{имп}} \approx 4$ А, $\tau_{\text{имп}} \approx 400$ нс), были получены ультракороткие импульсы длительностью около 100 пс.

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Исследованы генерационные характеристики лазеров на новых красителях из классов пиронов и периинденонов. В этих классах найдены соединения, не уступающие лучшим лазерным красителям и обеспечивающие высокий КПД лазеров и их широкую область перестройки длины волны излучения (более 100 нм).
2. Создан импульсный перестраиваемый лазер на красителе с поперечной накачкой полупроводниковыми лазерами ($\lambda_{\text{нак}} = 445$ нм). В лазере применяется трехзеркальный резонатор с полным внутренним отражением генерируемого излучения в кювете с раствором красителя и частичной компенсацией астигматизма. Диапазон перестройки длин волн генерации превышает 200 нм (497 нм — 699 нм). Дифференциальный КПД в лазере с неселективным резонаторе достигает 18 %.
3. Разработан импульсный перестраиваемый лазер на красителе с квазипродольной накачкой полупроводниковыми лазерами ($\lambda_{\text{нак}} = 513$ нм) с частичной компенсацией астигматизма. Достигнут диапазон перестройки 145 нм (537 нм — 682 нм) и КПД свыше 25 % в селективном резонаторе, при этом дифференциальный КПД в широкополосном резонаторе составляет 45 %.
4. Реализован импульсный перестраиваемый полимерный лазер на красителе с трехзеркальным резонатором с квазипродольной накачкой полупроводниковыми лазерами. Экспериментально получен диапазон перестройки от 545 нм до 607 нм (62 нм). Дифференциальный КПД составляет 25 % в широкополосном резонаторе при фотостойкости до 100 тысяч импульсов в одну и ту же область фокусировки излучения накачки.

5. Продемонстрирован режим синхронизации продольных мод в импульсном перестраиваемом лазере на красителе при синхронной накачке полупроводниковыми лазерами. Получены 100 пс импульсы в лазере на красителе родамин 6Ж при использовании насыщающегося поглотителя DODCI.

В **Приложении** приведены структурные формулы молекул всех лазерных красителей, исследованных или использованных в рамках данной диссертационной работы.

Публикации автора по теме диссертации

В рецензируемых научных журналах, индексируемых в базе данных Web of Science

1. С. П. Белов, О. А. Бурдукова, И. В. Комлев, В. А. Петухов, В. А. Поведайло, М. А. Семенов / Новые эффективные лазерные красители для красной области спектра. Ч.1. Периинденоны // Квантовая электроника. — 2016. — Т. 46, № 7. — С. 589—593. — DOI: 10.1070%2FQEL16117.
2. С. П. Белов, О. А. Бурдукова, И. В. Комлев, В. А. Петухов, В. А. Поведайло, О. В. Пономарева, М. А. Тавризова, М. А. Семенов / Новые эффективные лазерные красители для красной области спектра. Ч.2. Производные пионов // Квантовая электроника. — 2016. — Т. 46, № 10. — С. 873—876. — DOI: 10.1070/QEL16191.
3. O. A. Burdukova, M. V. Gorbunkov, V. A. Petukhov, M. A. Semenov / Diode-pumped dye laser // Laser Physics Letters. — 2016. — Vol. 13. — P. 105004. — DOI: 10.1088/1612-2011/13/10/105004.
4. O. Burdukova, M. Gorbunkov, V. Petukhov, M. Semenov / Diode pumped tunable dye laser // Applied Physics B. — 2017. — Vol. 123. — P. 84. — DOI: 10.1007/s00340-017-6664-4.
5. O. A. Burdukova, V. A. Petukhov, M. A. Semenov / Highly efficient tunable pulsed dye laser longitudinally pumped by green diodes // Applied Physics B. — 2018. — Vol. 124, no. 9. — P. 188. — DOI: 10.1007/s00340-018-7058-y.
6. О. А. Бурдукова, С. М. Долотов, В. А. Петухов, М. А. Семенов / Полимерный лазер на красителях с накачкой зелеными полупроводниковыми лазерами // Квантовая электроника. — 2019. — Т. 49, № 8. — С. 745—748. — DOI: 10.1070%2FQEL16982.
7. O. A. Burdukova, S. M. Dolotov, V. A. Petukhov, M. A. Semenov / Tunable polymer dye laser pumped by two 513nm diodes // Laser Physics Letters. — 2020. — Vol. 17, no. 2. — P. 025801. — DOI: 10.1088/1612-202X/ab5f56.

В материалах научных конференций

1. S. P. Belov, O. A. Burdukova, I. V. Komlev, V. A. Petukhov, V. A. Povedailo, M. A. Semenov / New Efficient Laser Dyes For The Red Region. Periindenones // Журнал прикладной спектроскопии. — 2016. — Т. 83, № 6—16. — С. 462—463.
2. O. A. Burdukova, M. V. Gorbunkov, V. A. Petukhov, V. A. Povedailo, M. A. Semenov / Tunable Diode-Pumped Dye Laser // Журнал прикладной спектроскопии. — 2016. — Т. 83, № 6—16. — С. 476—477.
3. O. A. Burdukova, V. A. Petukhov, M. A. Semenov / Tunable Dye Lasers Pumped by Visible Diodes // Optics, Photonics and Lasers / ed. by S. Y. Yurish. — Int Frequency Sensor Assoc (IFSA), 2018. — P. 81—84. — 1st International Conference on Optics, Photonics and Lasers (OPAL), Barcelona, Spain, May 9–11, 2018.

Список литературы

1. Multiwavelength distributed-feedback dye laser array and its application to spectroscopy / Y. Oki [et al.] // Opt. Lett. — 2002. — Vol. 27, no. 14. — P. 1220—1222.
2. Gurian, J. H. Kilohertz dye laser system for high resolution laser spectroscopy / J. H. Gurian, H. Maeda, T. F. Gallagher // Review of Scientific Instruments. — 2010. — Vol. 81, no. 7. — P. 073111.
3. Dye laser in ophthalmic diseases / K.-S. Wang [et al.] // Lasers in Surgery and Medicine. — 1982. — Vol. 2, no. 1. — P. 65—72.
4. L'Esperance, F. A. Clinical Applications of the Organic Dye Laser / F. A. L'Esperance // Ophthalmology. — 1985. — Vol. 92, issue 11. — P. 1592—1600.
5. Шахно, Е. А. Физические основы применения лазеров в медицине / Е. А. Шахно. — СПб.: НИУ ИТМО, 2012. — 129 с.
6. Tunable dye laser amplifier chain for laser isotope separation / I. S. Grigoriev [et al.] // Quantum Electronics. — 2004. — Vol. 34, no. 5. — P. 447—450.
7. Selective photoionization of palladium isotopes using a two-step excitation scheme / C. Locke [et al.] // Applied Physics B. — 2017. — Vol. 123. — P. 240.
8. Magneto-optical trapping of holmium atoms / J. Miao [et al.] // Phys. Rev. A. — 2014. — Vol. 89, issue 4. — P. 041401.
9. Nemova, G. Laser cooling of solids / G. Nemova, R. Kashyap // Reports on Progress in Physics. — 2010. — Vol. 73, no. 8. — P. 086501.

10. *Lippincott-Schwartz, J.* Development and Use of Fluorescent Protein Markers in Living Cells / J. Lippincott-Schwartz, G. H. Patterson // Science. — 2003. — Vol. 300, no. 5616. — P. 87–91.
11. *Weber, M. J.* Handbook of Lasers / M. J. Weber. — CRC Press, 2019. — (Laser & Optical Science & Technology).
12. Efficient directly emitting high-power $\text{Tb}^{3+}:\text{LiLuF}_4$ laser operating at 587.5 nm in the yellow range / E. Castellano-Hernandez [et al.] // Opt. Lett. — 2018. — Vol. 43, no. 19. — P. 4791–4794.
13. High-efficiency, yellow-light Dy^{3+} -doped fiber laser with wavelength tuning from 568.7 to 581.9 nm / H. Wang [et al.] // Opt. Lett. — 2019. — Vol. 44, no. 17. — P. 4423–4426.
14. Diode-pumped $\text{Pr}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ continuous-wave orange laser / D. Paboeuf [et al.] // Opt. Lett. — 2011. — Vol. 36, no. 2. — P. 280–282.
15. *Essam-Elden, M. M.* Successful treatment of facial vascular skin diseases with a 577-nm pro-yellow laser / M. M. Essam-Elden, M. T. Khaled, H. A. Wafaa // Journal of Cosmetic Dermatology. — 2019. — Vol. 18, no. 6. — P. 1675–1679.
16. High power tunable yellow laser using $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ vertical external-cavity surface-emitting lasers / M. Fallahi [et al.] // 2008 IEEE 21st International Semiconductor Laser Conference. — IEEE. 2008. — P. 169–170.
17. *Ghotbi, M.* BiB_3O_6 femtosecond optical parametric oscillator / M. Ghotbi, A. Esteban-Martin, M. Ebrahim-Zadeh // Opt. Lett. — 2006. — Vol. 31, no. 21. — P. 3128–3130.
18. Tunable organic thin-film laser pumped by an inorganic violet diode laser / T. Riedl [et al.] // Applied Physics Letters. — 2006. — Vol. 88, no. 24. — P. 241116.
19. Diode pumped distributed Bragg reflector lasers based on a dye-to-polymer energy transfer blend / A. E. Vasdekis [et al.] // Optics Express. — 2006. — Vol. 14, no. 20. — P. 9211–9216.
20. Diode-pumped distributed-feedback dye laser with an organic-inorganic microcavity / H. Sakata [et al.] // Applied Physics B. — 2008. — Vol. 92, no. 2. — P. 243–246.
21. *Sakata, H.* Diode-pumped polymeric dye lasers operating at a pump power level of 10 mW / H. Sakata, H. Takeuchi // Applied Physics Letters. — 2008. — Vol. 92, no. 11. — P. 113310.
22. *Matsuura, H.* Threshold reduction induced by silica nanoparticle-dispersed active layer in diode-pumped microcavity dye laser / H. Matsuura, M. Fukuda, H. Sakata // Laser Physics Letters. — 2009. — Vol. 6. — P. 194–197.

23. Expansion of emission band based on energy transfer in diode-pumped microcavity dye lasers / M. Fukuda [et al.] // Appl. Opt. — 2010. — Vol. 49. — P. 2552–2556.
24. Continuously tunable solution-processed organic semiconductor DFB lasers pumped by laser diode / S. Klinkhammer [et al.] // Opt. Express. — 2012. — Vol. 20. — P. 6357–6364.
25. *Scheps, R.* Near-IR dye laser for diode-pumped operation / R. Scheps // IEEE Journal of Quantum Electronics. — 1995. — Vol. 31, no. 1. — P. 126–134.
26. High brightness diode-pumped organic solid-state laser / Z. Zhao [et al.] // Applied Physics Letters. — 2015. — Vol. 106, no. 5. — P. 051112.
27. *Minassian, A.* Ultrahigh-efficiency TEM₀₀ diode-side-pumped Nd:YVO₄ laser / A. Minassian, B. Thompson, M. J. Damzen // Applied Physics B. — 2003. — Vol. 76, no. 4. — P. 341–343.
28. *Damzen, M. J.* Diode-side-pumped Alexandrite slab lasers / M. J. Damzen, G. M. Thomas, A. Minassian // Opt. Express. — 2017. — Vol. 25, no. 10. — P. 11622–11636.
29. Astigmatically compensated cavities for CW dye lasers / H. Kogelnik [et al.] // IEEE Journal of Quantum Electronics. — 1972. — Vol. 8, no. 3. — P. 373–379.