

УТВЕРЖДАЮ

Врио директора Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Институт
спектроскопии Российской академии
наук (ИСАН)

д.ф.-м.н. Задков Виктор Николаевич

19 января 2021 г.

Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу Бурдуковой Ольги Александровны «Лазеры на красителях видимого спектрального диапазона с полупроводниковой накачкой», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика.

Актуальность темы диссертации

Диссертационное исследование Бурдуковой О.А. направлено на разработку новых эффективных перестраиваемых лазеров на красителях видимого диапазона с короткими импульсами и накачкой полупроводниковыми лазерными диодами. Перестраиваемые лазерные источники излучения широко используются в фундаментальных и прикладных научных исследованиях. Лазеры на растворах органических красителей, перекрывающие широкий спектральный диапазон, в течение долгого времени были основным источником перестраиваемого по длинам волн излучения, в т.ч. импульсного. В настоящее время для получения перестраиваемого лазерного излучения в импульсном режиме, как правило, используются твердотельные лазеры на кристаллах александрита, сапфира, кольквиирита и других. Однако для многих приложений перечисленные твердотельные источники не подходят, поскольку, даже с использованием гармоник, перекрыть желто-зеленый диапазон спектра не удастся. Эффективная лазерная генерация в указанной спектральной области важна для развития медицинских технологий, лазерной спектроскопии, разделения изотопов и других приложений. Универсальность лазеров на красителях делает их привлекательным инструментом как для рутинных лабораторных исследований, так и для прикладных задач, однако эти системы не лишены существенных недостатков: значительные габариты, высокая стоимость и

высокое энергопотребление. Все эти недостатки в основном определяются системой накачки лазеров на красителях, так как традиционными источниками возбуждения являются аргоновый или криптоновый лазеры. Замена этих систем накачки на существенно более компактные и недорогие лазерные диоды позволит значительно снизить стоимость лазеров на красителях, уменьшить их габариты и снизить энергопотребление. Таким образом, тематика диссертационного исследования О.А. Бурдуковой весьма актуальна и представляет интерес для широкого круга исследователей.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, списка рисунков, списка таблиц, одного приложения. Работа изложена на 122 страницах машинописного текста, содержит 50 рисунков и 13 таблиц. Список литературы включает 138 наименований.

Во введении обоснована актуальность исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Сформулированы цели, задачи работы и научные положения, выносимые на защиту. Указан личный вклад автора, представлена апробация работы на конференциях и семинарах. Приведен краткий литературный обзор работ по диодной накачке перестраиваемых лазеров.

В первой главе представлен обзор литературы по тематике диссертации. Кратко изложена история развития лазеров на красителях и их особенности. Указаны области их применения и рассмотрены основные источники накачки лазеров на красителях. Представлен обзор работ, посвященных использованию полупроводниковых лазеров в качестве источника накачки для перестраиваемых лазеров (в том числе и лазеров на красителях).

Вторая глава диссертации посвящена исследованию генерационных характеристик впервые синтезированных красителей классов пиранов и птериинденонов, генерирующих в оранжево-красной области спектра. Подробно описаны схемы экспериментальных установок и методика измерения генерационных характеристик лазеров на основе растворов новых красителей. Проведено сравнение измеренных лазерных характеристик для новых веществ с широко используемыми красителями, такими как Родамин 6Ж, DCM и др. Часть из исследованных в этой главе веществ продемонстрировала высокие значения КПД и широкие диапазоны перестройки в лазерах. Новые вещества, обладающие наиболее низкими порогами генерации, были отобраны для экспериментов по их возбуждению полупроводниковыми лазерами.

Третья глава посвящена описанию жидкостного лазера на красителе с импульсной поперечной накачкой тремя синими (443 нм) многомодовыми лазерными диодами. Приведены основные характеристики мощных нитрид-галлиевых диодов NDB7K75, выбранных в качестве источника накачки, проведен анализ возможных схем возбуждения с использованием таких лазерных диодов и обоснован выбор поперечной схемы накачки в трехзеркальном резонаторе с полным внутренним отражением генерируемого излучения в кювете с раствором красителя. Обоснована необходимость проведения предварительных исследований по отбору лазерных красителей, потенциально подходящих для возбуждения синими диодами. Подробно описан эксперимент по отбору красителей, обладающих наиболее низкими порогами генерации, для этого применялся вспомогательный лазер на красителе, который имитировал диодную накачку. Выбранная для возбуждения синими лазерными диодами схема позволила эффективно использовать излучение накачки трех многомодовых диодов, благодаря чему в данной работе впервые была продемонстрирована перестройка в широком спектральном диапазоне (более 200 нм) лазера на красителе с диодной накачкой.

В четвертой главе описаны эксперименты по накачке лазеров на красителях импульсами зеленых (513 нм) многомодовых нитрид-галлиевых диодов NDG7475. Эксперименты по возбуждению лазеров на красителях зелеными лазерными диодами проводились впервые. Представлен анализ особенностей схемы накачки и резонатора, предложенного в третьей главе, и обоснован переход к возбуждению излучением зеленых полупроводниковых лазеров в квазипродольной схеме накачки. Подробно описана квазипродольная схема возбуждения, трехзеркальный резонатор лазера на красителях и установлены оптимальные параметры лазерных диодов накачки. Основным результатом, описанный в данной главе – это реализация широкой области перестройки длины волны и высокие значения КПД для лазерной генерации при накачке зелеными лазерными диодами, которые являются рекордными для лазеров на красителях с полупроводниковой накачкой.

Пятая глава диссертации посвящена полимерному лазеру на красителе с накачкой зелеными лазерными диодами. Обоснована актуальность разработки твердотельных лазеров на красителях и необходимость экспериментального подбора оптимальной полимерной матрицы для этих целей. Изложены результаты измерений лазерных характеристик наиболее эффективных красителей в нескольких полимерных матрицах при их возбуждении диодами. Оптическая схема и параметры возбуждения полимерного лазера аналогичны тем, что представлены в четвертой главе. Активным элементом в полимерном

лазере являлся триплекс, состоящий из пары стекол и слоя полимера между ними, который был легирован красителем класса пиррометенов. Приведены кривые перестройки, КПД генерации для трех наиболее эффективных красителей в различных полимерных составах и результаты измерений их фотостойкости. Проведено сравнение лазерных характеристик для жидкостного и полимерного лазеров, рассматриваемых в четвертой и пятой главах диссертации. Впервые была продемонстрирована перестройка длины волны генерации в полимерном лазере на красителях с диодной накачкой в широком спектральном диапазоне. Анализ результатов показал, что исследованные в данной работе полимерные лазеры значительно превосходят по эффективности известные в литературе полимерные лазеры с диодной накачкой.

Шестая глава посвящена получению режима синхронизации продольных мод в жидкостном лазере на красителе родамин 6Ж при его квазипродольном возбуждении импульсами зеленых лазерных диодов. Кратко изложены особенности формирования ультракоротких импульсов в лазерах на красителях. В шестой главе рассмотрены как пассивный метод синхронизации мод с использованием насыщающихся поглотителей, так и гибридный метод с частичной синхронной накачкой. Обсуждается выбор пары красителей для пассивной синхронизации мод и проводится анализ предварительных результатов, указывающих на неполную синхронизацию. Кратко описаны затруднения, которые неизбежно возникают при синхронной диодной накачке, и приведены параметры драйвера питания лазерных диодов, обеспечивающих достаточную модуляцию излучения. При синхронной накачке красителя короткими импульсами полупроводниковых лазеров с частотой следования около 220 МГц и использовании насыщающегося поглотителя DODCI, экспериментально получен режим синхронизации мод и цуги из одиночных субнаносекундных импульсов. Результаты данной главы могут быть использованы в качестве рекомендаций для разработки и недорогих перестраиваемых лазеров ультракоротких импульсов.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Научная новизна исследования

К числу наиболее значимых результатов, обладающих новизной, следует отнести экспериментальную реализацию перестройки длины волны генерации в широком спектральном диапазоне в лазерах на красителях при полупроводниковой накачке. Для жидкостных и полимерных лазеров на красителях получены высокие КПД, значительно превышающие результаты, полученные другими исследователями. Режим синхронизации продольных

мод в подобном лазере был продемонстрирован впервые, что дает основания надеяться на практическую реализацию новых типов источников лазерного излучения.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов

Все результаты, представленные в диссертации О.А. Бурдуковой, являются достоверными и обоснованными. Выводы диссертации и положения, выносимые на защиту, основаны на результатах экспериментальных исследований, выполненных на сертифицированном научном оборудовании с использованием апробированных методов. Расчетные данные, полученные при моделировании используемых лазерных схем, согласуются с экспериментальными результатами.

Научная и практическая значимость полученных результатов

Разработаны и созданы прототипы эффективных перестраиваемых лазеров на красителях с накачкой полупроводниковыми лазерными диодами. С практической точки зрения ценными являются данные по лазерным красителям, подходящим для полупроводниковой накачки, предложенные схемы резонаторов для возбуждения синими и зелеными лазерными диодами. Результаты, полученные в диссертации, могут стать основой для создания недорогих, компактных и эффективных лазеров, позволяющих осуществлять перестройку длины волны в желто-зеленой области спектра (500-700 нм) и работающих в импульсном режиме, в т.ч. при ультракоротких длительностях импульсов (до 10^{-10} с).

Полученные в работе результаты представляют несомненный научный и практический интерес и могут быть рекомендованы для использования в организациях, работающих в области лазерной физики, лазерной спектроскопии, физики конденсированного состояния: Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Институте прикладной физики РАН, Институте лазерной физики СО РАН, Самарском филиале ФИАН, Университете ИТМО, Московском государственном университете, Московском физико-техническом институте, Казанском федеральном университете.

Оценка работы

Диссертация О.А. Бурдуковой представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне. Представленные в диссертации материалы свидетельствуют об авторе как о квалифицированном исследователе, владеющем как экспериментальной

лазерной техникой, так и средствами теоретического анализа полученных экспериментальных данных. Диссертация написана понятным языком и хорошо структурирована. Тема и содержание диссертации соответствуют специальности 01.04.05 – оптика. Автореферат полно и правильно отражает содержание работы, ее результаты и выводы. Полученные результаты прошли апробацию на международных и всероссийских научных конференциях и семинарах, и в полной мере опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Замечания по работе

1. В тексте диссертации утверждается, что лазер с примесным полимером в качестве рабочего тела обладает фотостойкостью для разных красителей 10^3 - 10^5 секунд. При частоте следования возбуждающих импульсов, к примеру, 1 кГц, лазер на красителе проработает не более 100 секунд. Необходимо пояснить, почему автор утверждает при этом, что полимер обладает «достаточно высокой» фотостойкостью (стр. 80). Также приведенные значения фотостойкости требуют пояснения, т.к. процесс деградации полимеров при воздействии лазерного излучения будет накапливаться, и значения должны отличаться друг от друга.

2. В пятой главе описывается исследование генерационных характеристик красителей внутри полимерных матриц. В качестве резонатора используется триплекс стекло\полимер с красителем\стекло, и указывается, что толщина полимерной пленки, зажатой между стеклами, составляет 0,07-0,11 мм. Однако убедительного обоснования данных значений толщин в тексте не приводится.

3. В обзоре литературы не приводится информации о существующих работах по генерации лазерного излучения на квантоворазмерных структурах. Среди таких работ можно было бы отметить, например: 1) Deppe D.G., Shavritranuruk K., Ozgur G. Quantum dot laser diode with low threshold and low internal loss. Electronics Letters 2009. V. 45(1). P. 54 – 56; 2) Arakawa Y, Sakaki H. Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current. Applied Physics Letters. 1982. V. 40. P. 939 и другие.

Сделанные замечания не затрагивают защищаемых положений и не оказывают заметного влияния на общую положительную оценку работы.

Заключение

Диссертационная работа «Лазеры на красителях видимого спектрального диапазона с полупроводниковой накачкой» полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в

соответствии с п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор–Бурдукова Ольга Александровна–заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика.

Доклад Бурдуковой О.А. по материалам диссертации был заслушан и обсужден на семинаре отдела спектроскопии конденсированных сред ИСАН 22 декабря 2020 года (протокол № 3). Отзыв подготовлен младшим научным сотрудником, кандидатом физико-математических наук Магаряном К.А. и одобрен на заседании семинара.

Младший научный сотрудник
лаборатории электронных спектров молекул
отдела спектроскопии конденсированных сред
ИСАН, кандидат физ.-мат. наук
Магарян Константин Арутюнович
тел.: 8(495)851-02-36
e-mail: ka.magaryan@phys.mpgu.edu

Председатель семинара
главный научный сотрудник,
заведующий отделом спектроскопии
конденсированных сред ИСАН,
доктор физ.-мат. наук, профессор РАН
Наумов Андрей Витальевич
тел.: 8(495)851-02-36
e-mail: naumov@isan.troitsk.ru

Подписи сотрудников ИСАН К.А. Магаряна и А.В. Наумова заверяю.

Ученый секретарь ИСАН
кандидат физ.-мат. наук



Кильдиярова Римма Рифовна

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН)
108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5.
телефон: 8(495)851-02-36
e-mail: isan@isan.troitsk.ru

Список основных научных публикаций сотрудников Института спектроскопии Российской академии наук (ИСАН) по теме диссертации Бурдуковой Ольги Александровны "Лазеры на красителях видимого спектрального диапазона с полупроводниковой накачкой" в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Savostianov A.O., Eremchev I.Y., Gorshelev A.A. *et al.* Direct Observation of a Quasilocalized Low-Frequency Vibrational Mode in the Fluorescence Excitation Spectrum of a Single Impurity Molecule in a Polymer Matrix. *Opt. Spectrosc.* **126**, 44–48 (2019).
2. Eremchev I.Y., Eremchev M.Y., Naumov A.V. Multifunctional far-field luminescence nanoscope for studying single molecules and quantum dots (50th anniversary of the Institute of Spectroscopy, Russian Academy of Sciences). *Physics-Uspekhi*. **62**, 294 (2019).
3. Gladush, M.G., Anikushina, T.A., Gorshelev, A.A. *et al.* Dispersion of Lifetimes of Excited States of Single Molecules in Organic Matrices at Ultralow Temperatures. *J. Exp. Theor. Phys.* **128**, 655–663 (2019).
4. Savostianov, A.O., Eremchev, I.Y., Gorshelev, A.A. *et al.* Wide-Range Spectral Diffusion in Single Mg-Tetraazaporphyrin Molecules in a Polymer Matrix at Cryogenic Temperatures. *JETP Lett.* **107**, 406–411 (2018).
5. Karimullin K., Naumov A. Low-temperature dynamics in a dye-doped polymer: correspondence between the data obtained by photon echo and single molecule spectroscopy. *EPJ Web Conf.* **190**, 04008 (2018).
6. Knyazev, M., Karimullin, K. and Naumov, A. Revisiting the combined photon echo and single-molecule studies of low-temperature dynamics in a dye-doped polymer. *Phys. Status Solidi RRL*, **11**, 1600414(2017).
7. Y.G. Vainer, Y.I. Sobolev, A.V. Naumov, I.S. Osad'ko, L. Kador, Fluorescence microscopy and spectroscopy of subsurface layer dynamics of polymers with nanometer resolution in the axial direction. *Faraday Discussions*. **184**, 237–249 (2015).
8. M. Orrit *et al.*, Quantum optics, molecular spectroscopy and low-temperature spectroscopy: General discussion. *Faraday Discussions*. **184**, 275–303 (2015).
9. I.S. Osad'ko, I.Y. Eremchev, A.V. Naumov, Two Mechanisms of Fluorescence Intermittency in Single Core/Shell Quantum Dot. *Journal of Physical Chemistry C*. **119**, 22646–22652 (2015).
10. A.L. Shchukina, I.Y. Eremchev, A.V. Naumov, Looking at a blinking quantum emitter through time slots: The effect of blind times. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*. **92**, 032102 (2015).