

УДК 53.087.4, 543.421/.424

ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ И ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ АКТИВНОЙ СРЕДЫ

А.А. Адамов^а, М.С. Баранов^а, В.Н. Храмов^а

^а Волгоградский государственный университет, Волгоград, 400062, Российская Федерация

Адрес для переписки: anto-khal@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 19.02.18, принята к печати 22.03.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-356-362

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Адамов А.А., Баранов М.С., Храмов В.Н. Зависимость спектральных характеристик полупроводниковых и твердотельных лазеров видимого диапазона от температуры активной среды // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 3. С. 356–362. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-356-362

Аннотация

Приведены результаты исследований по влиянию температуры активной среды, изменяющейся при работе полупроводниковых и твердотельных (DPSS) лазеров видимого диапазона, на выходные спектральные характеристики. Представлены результаты изучения спектрально-оптических параметров излучения полупроводниковых лазеров, их длин когерентности и зависимости положения спектрального максимума от температуры. Это необходимо для подбора наиболее оптимального лазера, который в дальнейшем планируется использовать в медицинской офтальмологической диагностике. Эксперимент проводился с использованием твердотельных (DPSS) и полупроводниковых лазерных модулей на основе лазерного диода. Получены спектральные зависимости от температуры активной среды лазеров в диапазоне от 300 до 370 К. Спектры были записаны с помощью автоматизированного спектрального комплекса на базе монохроматора МДР-23. Показана возможность определения внутреннего повреждения стабилизации лазерных модулей без механического вмешательства, а только с использованием их спектральной характеристики. Полученные данные позволяют учитывать температурные характеристики и дальнейшую оптимизацию параметров таких лазеров.

Ключевые слова

полупроводниковый лазер, спектральная характеристика, спектральный пик, температурная зависимость, длина когерентности

Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке гранта УМНИК 17-12 (б), Волгоградская область – 2017.

DEPENDENCE OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR AND SOLID STATE LASERS OF VISIBLE RANGE ON ACTIVE ENVIRONMENT TEMPERATURE

A.A. Adamov^a, M.S. Baranov^a, V.N. Khramov^a

^a Volgograd State University, Volgograd, 400062, Russian Federation

Corresponding author: anto-khal@mail.ru

Article info

Received 19.02.18, accepted 22.03.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-356-362

Article in Russian

For citation: Adamov A.A., Baranov M.S., Khramov V.N. Dependence of spectral characteristics of semiconductor and solid state lasers of visible range on active environment temperature. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 356–362 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-356-362

Abstract

We consider research results on the effect of the active medium temperature, which varies with the operation of semiconductor and solid-state (DPSS) lasers of the visible range, on the output spectral characteristics. The paper presents the study results of the spectral-optical radiation parameters of semiconductor lasers, their coherence lengths, and the dependence of the spectral maximum position on temperature. This study is necessary for selection of the most optimal laser, which in the future is planned to be used in medical ophthalmologic diagnostics. The experiment was carried out by solid-state (DPSS) and semiconductor laser modules based on a laser diode. Spectral dependences on the active medium temperature of lasers

were obtained, ranging from 300 to 370 K. The spectra were recorded with the use of an automated spectral complex based on the MDR-23 monochromator. We show determination possibility of the internal stabilization damage of laser modules without mechanical intervention but only by applying their spectral characteristics. The obtained data give the possibility to take into account the temperature characteristics and perform further optimization for parameters of such lasers.

Keywords

semiconductor laser, spectral characteristics, spectral peak, temperature dependence, coherence length

Acknowledgements

This work was partially supported by the grant UMNIK 17-12 (b), Volgograd Region-2017.

Введение

Применение лазеров [1–3], в частности, в офтальмологии [4–7], довольно разнообразно: рассечение глазодвигательных мышц; ликвидация некоторых опухолей; выполнение разрезов и проколов глазного яблока; коагуляция отдельных участков сетчатки при ретинопластике; приваривание отслоившейся сетчатки; создание фистулы (прохода) между передней и задней камерами глаза при глаукоме; удаление хрусталика при катаракте; кератопластика (проведение операций по пересадке роговицы); коррекция зрения [4]; лечение язвы роговицы [4, 5]; кернеотопография. В последних четырех случаях лазерное излучение используется для контроля толщины роговицы и (или) остаточных роговичных слоев. Это накладывает ряд дополнительных ограничений на параметры лазерного излучения для медицинской диагностики, которые зависят от методики проведения измерения толщины, но общим требованием является низкая интенсивность пучка. При относительно высокой мощности лазерного пучка во время измерения толщины роговичного слоя ткани глаза могут подвергнуться повреждающему воздействию (ожог роговицы, хрусталика и сетчатки).

Актуальной задачей является сохранение стабильного положения спектрального максимума полупроводниковых лазеров, так как его смещение ведет за собой ряд негативных последствий, что недопустимо при проведении хирургического вмешательства в офтальмологии, например, при измерении толщины роговицы с использованием лазерного источника излучения [8–12]. На сегодняшний момент таких исследований проведено крайне мало [13–16].

Особый интерес представляет изучение свойств лазерного излучения для интерферометрического и эллипсометрического методов определения толщины тонких биологических тканей (пленок). В триангуляционном методе [9–12] лазерный луч используется в качестве указателя и должен формировать плоский волновой фронт для максимальной перетяжки фокусируемого луча на поверхности биоткани, прозрачной для излучения. Толщина пленки определяется через параметры интерференционной картины (период полос) и расстояние от источника до приемника излучения. Интерференционная картина в данном случае образуется путем деления естественной волны на две части, при этом оптическая разность хода между ними должна быть меньше, чем длина когерентности (длина цуга). Настоящая работа также посвящается определению и этого параметра.

В работе сделан упор на изучение спектрально-оптических параметров излучения именно полупроводниковых лазеров. По сравнению с другими типами лазеров полупроводниковые лазеры имеют ряд преимуществ [4]: компактное исполнение с размерами в диапазоне от микро- до миллиметров, что облегчает монтаж в любом оборудовании; прямое возбуждение с низкими электрическими токами и напряжениями; большой коэффициент полезного действия (свыше 50%); высокая интеграция с электронными компонентами и схемами, а также более простой способ осуществления модуляции излучения – внутренняя модуляция (в широких пределах до 1 ГГц) за счет изменения тока накачки, что является основным достоинством полупроводниковых лазеров. Хотя из-за небольшого резонатора получаемое излучение имеет сильную дифракционную расходимость, но с помощью соответствующих линз или коллимационной оптики можно реализовать почти параллельные пучки. В то же время отмечаются недостаточная стабильность частоты этих лазеров в одномодовом режиме и зависимость расположения спектрального пика от температуры.

В работе определялись длины когерентности полупроводниковых лазерных диодов, а также зависимость положения спектрального пика длины волны от температуры активной среды. Это необходимо для подбора лазера, оптимального для медицинской офтальмологической диагностики [9–12]. Заметим, что проведенные ранее работы [5, 13, 16] либо описывают не все необходимые параметры, либо относятся к инфракрасной (ИК) области спектра, которая не удовлетворяет условиям поставленной задачи с точки зрения окон прозрачности биоткани и безопасности применения.

Термоспектральные зависимости

Несмотря на то, что в конструкцию лазеров встроена система стабилизации мощности излучения на выходе, полупроводниковые лазерные модули нестабильно работают при изменении температуры активной среды. В данной работе проводилось экспериментальное определение зависимости положения спектрального максимума полупроводникового и твердотельного с диодной накачкой DPSS-лазеров (Diode

Pumped Solid State Laser) от температуры активной среды. Спектры были записаны с помощью автоматизированного спектрального комплекса на базе монохроматора МДР-23 [17, 18] по схеме, приведенной на рис. 1. Для питания лазеров использовался источник постоянного тока, величина которого не менялась в процессе проведения эксперимента. Температура на корпусе диода определялась с помощью термопары ТР-01 типа ТХА (хромель-алюмель NiCr/NiAl, тип К, точность 2,5%). Все измерения проводились при комнатной температуре ($T = 300$ К).

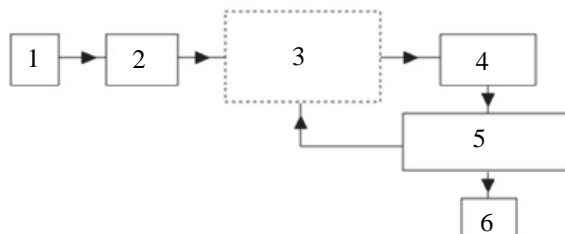


Рис. 1. Схема записи спектра лазера с помощью автоматизированного спектрального комплекса на базе монохроматора МДР-23: 1 – лазер; 2 – светофильтр; 3 – монохроматор МДР-23; 4 – фотоэлектронный умножитель; 5 – схема регистрации и управления; 6 – компьютер

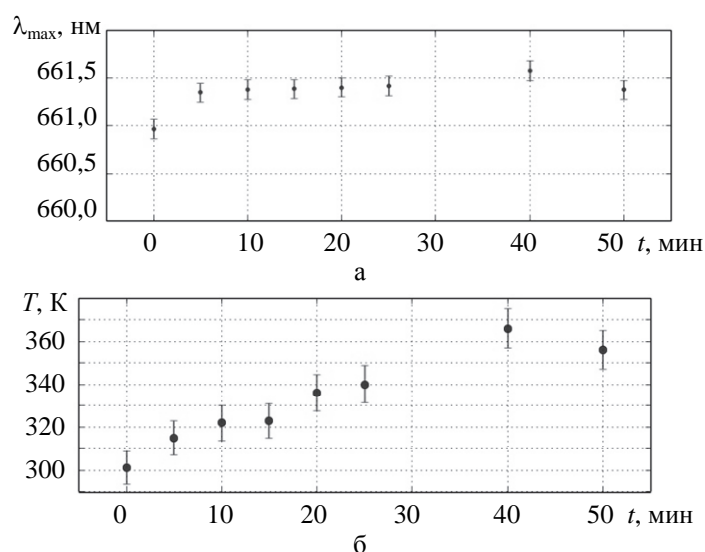


Рис. 2. Зависимость длины волны (а) и температуры полупроводникового лазерного диода с длиной волны в области 660 нм (б) от времени работы

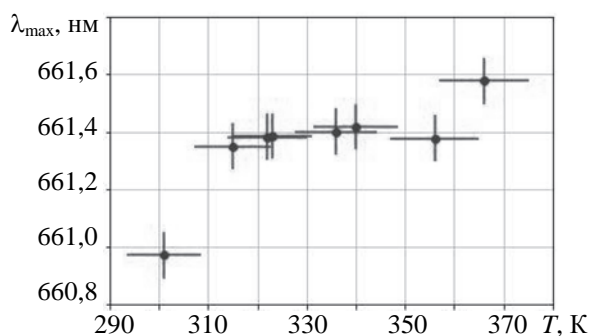


Рис. 3. Зависимость длины волны полупроводникового лазерного диода с длиной волны в области 660 нм от температуры

Результаты измерений приведены на рис. 2, 3.

Как видно из рисунков, прослеживается несильное изменение положения спектрального пика с увеличением температуры лазерного модуля. Положение спектрального максимума стабилизировалось после 5–10 мин работы лазера, однако при проведении достаточно тонких измерений при помощи подобных лазеров время стабилизации может сказаться на результатах. Зависимость изменения формы и положения спектрального максимума от размеров входной и выходной щелей спектрального комплекса не обнаружена.

- Мы выявили изменение вида спектра и его ширины (на уровне полувысоты) у следующих лазеров:
- модель HML1845 (Viper Series), фирма Dragon Lasers, производитель Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Ltd., страна производства Китай, длина волны 660 нм;
 - модель DC5V Locater (Viper Series), фирма Strong Laser, производитель Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Ltd., страна производства Китай, длина волны 405 нм.

В то же время для лазера с длиной волны в области 532 нм (модель LR-021 (Viper Series), фирма Dragon Lasers, производитель Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Ltd., страна производства Китай) таких изменений не наблюдалось. Это связано с конструкцией данного класса лазеров и наличием термостабилизации. Такие лазеры называют DPSS-лазерами, их схема показана на рис. 4.

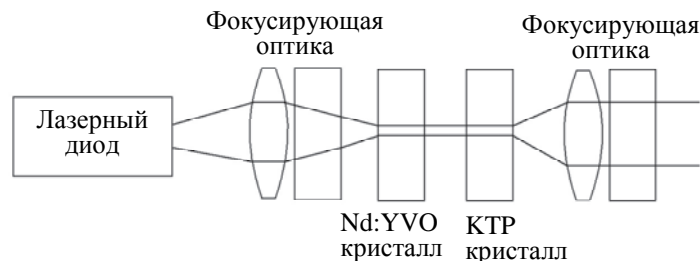


Рис. 4. Устройство DPSS лазерного модуля

DPSS-лазеры совмещают в себе все лучшие качества газовых лазеров и компактность обычных диодных. Существуют DPSS-лазеры голубого (457 нм), зеленого (532 нм) и желтого (593,5 нм) цвета, а также инфракрасные (1064 нм) лазеры.

Лазерный диод формирует исходное излучение с длиной волны 808 нм. Оно фокусируется и подается на двулучепреломляющий кристалл ванадата иттрия с неодимовым легированием Nd:YVO₄, который преобразует длину волны излучения в 1064 нм, из которого кристалл титанила-фосфата калия (КТР) формирует луч удвоенной частоты – 532 нм. Отметим, что при мощности излучения более 50 мВт нужно устанавливать ИК фильтр (или промежуточную линзу), чтобы избежать повреждения зрения.

В голубом DPSS-лазере используется похожая схема, но длина волны 808 нм конвертируется в 946 нм, а затем, при сдвигании луча, – в 473 нм. Для получения излучения с длиной волны 946 нм используется кристалл алюмо-иттриевого граната с добавками неодима (Nd:YAG). В желтых лазерах используется еще более многоступенчатый процесс конвертации длины волны излучения: 808 нм – 1064 нм – 1342 нм – 593,5 нм [14, 15].

Эффективным путем стабилизации спектральных характеристик лазерных модулей является стабилизация мощности излучения на выходе лазера. Для этого на выходе устанавливают светоделитель (роль которого выполняет ИК фильтр, от которого отражается часть излучения) и фотодиод и вводят отрицательную обратную связь.

Для лазера с длиной волны в области 405 нм наблюдалась сильная зависимость длины волны спектрального максимума от температуры (режим стабилизации определить не удалось), а также сильная зависимость интенсивности $I_{\max} = I_{\max}(\lambda_{\max})$. Причина этого, по нашему мнению, лежит не в изменении тока накачки, как указывалось в ряде работ [13–16], а в нарушении работы стабилизатора самого лазера, так как ток накачки не менялся на протяжении всего времени записи спектров. На этом можно основывать методику диагностирования состояния самих лазеров, не прибегая к извлечению их из корпусов.

Определение длины когерентности

Существуют различные методы определения длины когерентности – прямые (посредством интерферометров) и косвенные (через спекл-интерферометрию, голографические [19–21] и спектральные зависимости). В данной работе длины когерентности лазеров определялись через спектры этих лазеров, которые записывались с помощью автоматизированного спектрального комплекса на базе монохроматора МДР-23 по схеме, приведенной на рис. 1, и с помощью интерферометра Майкельсона.

Если рассматривать направленный пучок света источника с малыми угловыми размерами, но с достаточно широким спектром (относительно большая ширина спектра $\Delta\lambda$), то длина продольной когерентности определяется преимущественно шириной частотного спектра:

$$L \approx \frac{\lambda_{\max}^2}{\Delta\lambda} = l_c, \quad (1)$$

где l_c называется длиной временной когерентности, поскольку эта величина определяется временем когерентности и скоростью распространения света в данной среде. Если угловой спектр поля узок, а частотный спектр достаточно широк, то длина продольной когерентности поля равна длине временной когерентности, определяемой шириной частотного спектра поля [19, 21]. На рис. 5 приведен спектр для одного из DPSS-лазеров, который использовался в данной работе.

Запись спектров проводилась с использованием светофильтров (для ослабления лазерного луча), соответственно подобранных для каждого лазера: ЖЗС-9, ЖЗС-12, СЗС-8, СЗС-9, СЗС-20, СЗС-22, СС-6, ЗС-6, ТС-10; их спектральные характеристики пропускания указаны в [22].

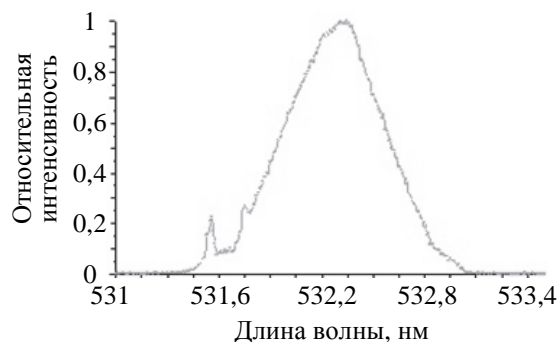


Рис. 5. Спектр излучения DPSS лазерного модуля

Если воспользоваться формулой (1), то теоретическая длина когерентности, рассчитанная через полуширину спектральной характеристики данного лазера, составит всего 0,1 мм. Однако, как показали прямые измерения длины когерентности на интерферометре Майкельсона, реальная длина когерентности полупроводниковых лазеров доходит до 4–5 см и даже до 30 см. Это говорит о том, что реальный спектр генерации полупроводникового лазера содержит богатый модовый состав, и длина когерентности определяется не полушириной всего спектра, а полушириной отдельно взятой моды.

Спектры s- и p-поляризованного лазерного излучения

В работе [16] используется интерферометрический метод определения толщины прозрачных пленок. Падающее под углом к исследуемой поверхности излучение отражается от пленки на твердотельной подложке и регистрируется фотоприемником. Указывается, что величина модуляции интенсивности (контраст полос) интерференционной картины оказывается больше для случая s-поляризации. По этой причине представляют интерес изучение спектров s- и p-поляризованного лазерного излучения и определение соответствующих длин когерентности. На рис. 6 представлены спектры исходного и поляризованных излучений (полученных при отражении от прозрачных пленок) для лазера с длиной волны 532 нм.

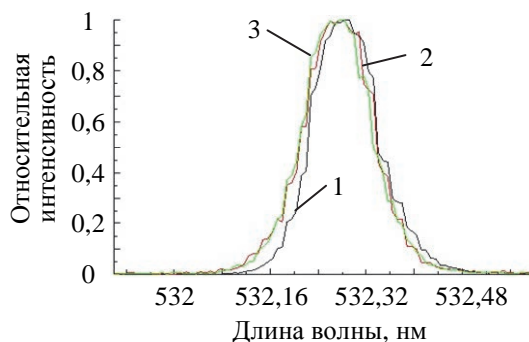


Рис. 6. Спектры поляризованного излучения DPSS лазерного модуля: 1 – неполяризованное; 2 – s-поляризованное; 3 – p-поляризованное

Если определить длину когерентности по формуле (1), используя полуширину всего спектра, то значения длин когерентности для неполяризованного и поляризованного излучения совпадут. Если в формуле (1) использовать не полуширину всего спектра, а полуширину отдельно взятой моды, то, как показано в предыдущем разделе, длина когерентности поляризованного излучения также не будет отличаться от неполяризованного: изменения модового состава излучения не наблюдаются и в видимой области длин волн. Частично этому вопросу была посвящена работа [18], но в ней рассмотрено лазерное излучение в ИК области.

В работе [18] также указывается, что в случае лазера с длиной волны в области 650 нм степень поляризации менялась от 0,1 до 0,9 в зависимости от тока накачки, а в случае лазера с длиной волны в области 532 нм – от 0,7 до 0,95. В областях модовой перестройки степень поляризации резко уменьшалась приблизительно на 10%. В случае со второй гармоникой направление линейной поляризации (азимут) при переходе от основной моды ко второй при определенном токе накачки скачкообразно меняется приблизительно на 20° и также обратно.

Предварительное объяснение этого явления основано на возможном увеличении азимута поляризации при нелинейном преобразовании (лазерная накачка и вторая гармоника), если предположить, что поляризация накачки незначительно меняется.

Заключение

По результатам работы можно сделать следующие выводы.

1. Получены спектральные зависимости излучения полупроводниковых лазеров видимого диапазона от температуры активной среды, изменяющейся от 300 до 370 К.
2. Предложен методика диагностирования состояния полупроводниковых лазерных модулей без механического вмешательства, а только посредством анализом их спектральной характеристики.
3. Показано, что длина когерентности для полупроводникового лазерного модуля определяется не полушириной всего спектра, а полушириной отдельно взятой моды излучения. Реальная длина когерентности отличается от теоретически рассчитанной по ширине всего спектра на 2–3 порядка.

Кроме этого, показано, что s- и p-поляризованные лучи DPSS-лазера имеют одинаковый модовый состав с неполяризованным излучением в видимой части спектра. Изменение спектральных характеристик данного типа лазера от температуры активной среды не обнаружено.

Литература

1. Qian Y., Cheng X, Zhang L. Applied research of semiconductor laser on laser encoding and emitting system // *Proceedings of SPIE*. 2008. V. 6824. doi: 10.1117/12.755934
2. Baranov M.S., Khramov V.N., Lotin A.A., Khaydukov E.V. Fabrication, size control and functionalization of silver nanoparticles by pulsed laser ablation synthesis in liquid // *Proceedings of SPIE*. 2017. V. 10336. doi: 10.1117/12.2267927
3. Baranov M.S., Khramov V.N., Chebanenko R.A. The polarization-optical measuring method of linearity of radiant-power characteristic of the laser emission photodetectors // *Proceedings of SPIE*. 2016. V. 9917. doi: 10.1117/12.2229841
4. Baranov M.S., Bardina A.A., Savelyev A.G., Khramov V.N., Khaydukov E.V. Laser ablation synthesis and spectral characterization of ruby nanoparticles // *Proceedings of SPIE*. 2016. V. 9917. doi: 10.1117/12.2229755
5. Baranov M.S., Khramov V.N. The regenerative and super-regenerative amplifications of the ultrashort laser pulses // *Proceedings of SPIE*. 2016. V. 10337. doi: 10.1117/12.2267891
6. Серебряков В.А. Опорный конспект лекций по курсу «Лазерные технологии в медицине». СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. 266 с.
7. Punke M., Woggon T., Stroisch M., Ebenhoch B., Geyer U., Karnutsch C., Gerken M., Lemmer U., Bruendel M., Wang J., Weimann T. Organic semiconductor lasers as integrated light sources for optical sensor systems // *Proceedings of SPIE*. 2007. V. 6659. doi: 10.1117/12.733165
8. Балашевич Л.И., Измайлов А.С., Качанов А.Б. Полупроводниковые лазеры в офтальмологии / В кн. Вопросы лазерной офтальмологии / Под ред. А.В. Большунова. М.: Апрель, 2013. С. 202–219.
9. Адамов А.А., Храмов В.Н. Оценка возможности применения метода лазерной триангуляции к измерениям толщин тонких пленок // *Математическая физика и компьютерное моделирование*. 2017. Т. 20. № 4. С. 83–94. doi: 10.15688/mpcm.jvolsu.2017.4.8
10. Адамов А.А. Применение метода лазерной триангуляции для измерения толщин тонких биологических тканей // *Материалы Научной сессии*. Волгоград, 2017. С. 454–459.
11. Adamov A.A., Khramov V.N. Modification of the laser triangulation method for measuring the thickness of optical layers [Электронный ресурс]. URL: <http://sfm.eventry.org/report/2655> (дата обращения: 22.11.2017).
12. Адамов А.А., Баранов М.С., В.Н. Храмов, Абдрахманов В.Л., Голубев А.В., Чечеткин И.А. Повышение разрешения световых меток при измерении толщины роговичного слоя глаза в методе лазерной триангуляции // VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник трудов. Москва, 2018. С. 542–543.
13. Баранов М.С. Модернизация системы регистрации автоматизированного двухканального спектрального

References

1. Qian Y., Cheng X, Zhang L. Applied research of semiconductor laser on laser encoding and emitting system. *Proceedings of SPIE*, 2008, vol. 6824. doi: 10.1117/12.755934
2. Baranov M.S., Khramov V.N., Lotin A.A., Khaydukov E.V. Fabrication, size control and functionalization of silver nanoparticles by pulsed laser ablation synthesis in liquid. *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10336. doi: 10.1117/12.2267927
3. Baranov M.S., Khramov V.N., Chebanenko R.A. The polarization-optical measuring method of linearity of radiant-power characteristic of the laser emission photodetectors. *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9917. doi: 10.1117/12.2229841
4. Baranov M.S., Bardina A.A., Savelyev A.G., Khramov V.N., Khaydukov E.V. Laser ablation synthesis and spectral characterization of ruby nanoparticles. *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9917. doi: 10.1117/12.2229755
5. Baranov M.S., Khramov V.N. The regenerative and super-regenerative amplifications of the ultrashort laser pulses. *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 10337. doi: 10.1117/12.2267891
6. Serebryakov V.A. *Summary of Lectures on the Course Laser Technologies in Medicine*. St. Petersburg, SPbSU ITMO, 2009, 266 p. (in Russian)
7. Punke M., Woggon T., Stroisch M., Ebenhoch B., Geyer U., Karnutsch C., Gerken M., Lemmer U., Bruendel M., Wang J., Weimann T. Organic semiconductor lasers as integrated light sources for optical sensor systems. *Proceedings of SPIE*, 2007, vol. 6659. doi: 10.1117/12.733165
8. Balashevich L.I., Izmailov A.S., Kachanov A.B. Semiconductor lasers in ophthalmology. In *Problems of Laser Ophthalmology*. Ed. A.V. Bol'shunov. Moscow, April Publ., 2013, pp. 202–219.
9. Adamov A.A., Khramov V.N. Evaluation of the possibility of applying the method of the laser triangulation to measurement of thin film thickness. *Mathematical Physics and Computer Simulation*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 83–94. doi: 10.15688/mpcm.jvolsu.2017.4.8
10. Adamov A.A. Application of the method of laser triangulation for measuring thickness thin biological tissue. *Proceedings of Science Session*. Volgograd, Russia, 2017, pp. 454–459. (in Russian)
11. Adamov A.A., Khramov V.N. Modification of the laser triangulation method for measuring the thickness of optical layers. Available at: <http://sfm.eventry.org/report/2655> (accessed: 22.11.2017).
12. Adamov A.A., Baranov M.S., V.N. Khramov, Abdrakhmanov V.L., Golubev A.V., Chechetkin I.A. Increasing the resolution of light marks when measuring the thickness of the corneal layer of the eye in the method of laser triangulation. *Proc. 7th Int. Conf. on Photonics and Information Optics*. Moscow, 2018, pp. 542–543. (in Russian)

- комплекса на базе МДР-23 // Материалы научной сессии. Волгоград, 2014. Ч. 1. С. 380–383.
14. Храмов В.Н., Марусин Н.В. Программа управления двухканальным автоматизированным спектральным комплексом на основе МДР-23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013614750. Оpubл. 21.06.13.
 15. Armstrong J.A., Smith A.W Intensity fluctuations in GaAs laser // *Physical Review Letters*. 1965. V. 14. P. 68–70. doi: 10.1103/PhysRevLett.14.68
 16. Волков В.Г. Твердотельные лазеры с накачкой мощными лазерными диодами, используемые в системах обеспечения безопасности // *Системы управления, связи и безопасности*. 2016. № 2. С. 142–181.
 17. Абрамов Д.В., Герке М.Н. Системы лазерной полупроводниковой накачки. Владимир: ВлГУ, 2015. 100 с.
 18. Пахалов В.Б. Спектральные моды и когерентность полупроводникового лазера и Nd-лазера с диодной накачкой вблизи порога генерации // *Письма в ЖТФ*. 2010. Т. 36. № 8. С. 14–22.
 19. Рябухо В.П., Лякин Д.В., Лычагов В.В. Продольная когерентность оптического поля // *Известия вузов. ПНД*. 2009. № 5. С. 30–42.
 20. Рябухо В.П. Интерференционный метод измерения толщины прозрачных слоев и покрытий [Электронный ресурс]. Саратов, СГУ, 2008. 20 с. URL: http://optics.sgu.ru/_media/library/education/liit.pdf
 21. Горбатенко Б.Б., Клименко И.С., Рябухо В.П., Федулеев Б.В. Интерферометр для измерения пространственной когерентности оптического излучения. А.с. СССР № 1450551.
 22. Спектральные характеристики пропускания светофильтров из цветного стекла [Электронный ресурс]. URL: http://www.elektrosteklo.ru/Color_Glass_Spectral_Transmittance.pdf (дата обращения 25.03.18).
 13. Baranov M.S. Modernization of the registration system for an automated two-channel spectral complex based on MDR-23. *Proceedings of Science Session*. Volgograd, Russia, 2014, part 1, pp. 380–383. (in Russian)
 14. Khramov V.N., Marusin N.V. Program for managing a two-channel automated spectral complex based on MDR-23. Certificate of Computer Program Registration RU 2013614750, 2013.
 15. Armstrong J.A., Smith A.W Intensity fluctuations in GaAs laser. *Physical Review Letters*, 1965, vol. 14, pp. 68–70. doi: 10.1103/PhysRevLett.14.68
 16. Volkov V.G. Solid-state lasers with high-power laser diodes pumping used in security systems. *Systems of Control, Communication and Security*, 2016, no. 2, pp. 142–181. (in Russian)
 17. Abramov D.V., Gerke M.N. *Laser Semiconductor Pumping Systems*. Vladimir, VISU Publ., 2015, 100 p. (in Russian)
 18. Pakhalov V.B. Near-threshold spectral modes and coherence of a semiconductor laser and a diode-pumped neodymium laser. *Technical Physics Letters*, 2010, vol. 36, no. 4, pp. 354–357. doi: 10.1134/S106378501004019X
 19. Ryabukho V.P., Lyakin D.V., Lychagov V.V. Longitudinal coherence of optical field. *Izvestiya Vuzov. PND*, 2009, no. 5, pp. 30–42. (in Russian)
 20. Ryabukho V.P. *Interference Method for Measuring the Thickness of Transparent Layers and Coatings*. Saratov, SSU Publ., 2008. 20 p. URL: http://optics.sgu.ru/_media/library/education/liit.pdf (in Russian)
 21. Gorbatenko B.B., Klimentko I.S., Ryabukho V.P., Feduleev B.V. Interferometer for Measuring the Spatial Coherence of Optical Radiation. *Patent RU1450551*.
 22. *Spectral Transmission Characteristics of Color Glass Filters*. Available at: http://www.elektrosteklo.ru/Color_Glass_Spectral_Transmittance.pdf (accessed 25.03.18).

Авторы

Адамов Антон Андреевич – аспирант, учебный мастер, Волгоградский государственный университет, Волгоград, 400062, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-7394-0744, anto-khal@mail.ru

Баранов Михаил Сергеевич – ассистент, Волгоградский государственный университет, Волгоград, 400062, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-1876-8216, mihail_sergeevich_1991@mail.ru

Храмов Владимир Николаевич – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой, Волгоградский государственный университет, Волгоград, 400062, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-8988-0929, vladimir.khramov@volsu.ru

Authors

Anton A. Adamov – postgraduate, training master hand, Volgograd State University, Volgograd, 400062, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-7394-0744, anto-khal@mail.ru

Mikhail S. Baranov – assistant, Volgograd State University, Volgograd, 400062, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-1876-8216, mihail_sergeevich_1991@mail.ru

Vladimir N. Khramov – PhD, Associate Professor, Head of Chair, Volgograd State University, Volgograd, 400062, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-8988-0929, vladimir.khramov@volsu.ru