

Межрегиональная олимпиада школьников

«Будущие исследователи — будущее науки»

**ПРЯМАЯ ОПТИЧЕСКАЯ НАКАЧКА ТИТАН-
САПФИРОВОГО ЛАЗЕРА С ПОМОЩЬЮ ДИОДОВ
СИНЕ-ЗЕЛЕННОГО ДИАПАЗОНА**

Секция: Физика

Научный руководитель
(руководитель отдела лазерных
генераторов ООО "АВЕСТА")



(подпись)

Маврицкий Алексей Олегович
(расшифровка подписи)

Количество баллов,
полученных на защите

95
(заполняется председателем жюри)

Председатель жюри


(подпись)

Алексей В.Н.
(расшифровка подписи)

Работу выполнил:
учащийся 11 класса

предуниверситария НИЯУ МИФИ
Лицея №1511

(полное наименование учебного заведения)

Г. Москва

(название населенного пункта)

Маврицкий Иван Алексеевич
(Ф.И.О. учащегося ПОЛНОСТЬЮ)

Саров
2025 год

Оглавление

1. Введение	3
1.1. Принцип работы лазера	3
1.2. Разновидности лазеров	7
2. Актуальность и значимость проекта	9
3. Цель проекта	11
4. Практическая часть	12
4.1 Блок питания и управления лазерными диодами	12
4.2 Техническое исполнение сборки держателя диодов	14
4.3 Характеристики используемых диодов.....	16
4.4 Схема установки.....	21
4.4 Измерение параметров выходного излучения титан-сапфирового лазера	26
5. Анализ полученных результатов	28
6. Перспективы развития	29
7. Список используемой литературы.....	30

1. Введение

*“Информация – это не знание.
Единственный источник знаний – это опыт.”
Альберт Эйнштейн.*

ЛАЗЕР (оптический квантовый генератор, аббревиатура слов английской фразы: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, что означает «усиление света вынужденным излучением») – устройство, преобразующее различные виды энергии (электрическую, световую, химическую, тепловую и так далее) в энергию когерентного электромагнитного излучения оптического диапазона.

Области применения лазеров весьма разнообразны, они широко используются в науке, медицине, на производствах, в метрологии, коммуникации, в устройствах хранения информации. Над обоснованием возможности и непосредственным созданием лазера работали многие ученые с начала XX века. Самые известные из них — А. Эйнштейн, Ч. Таунс, Т. Майман, А.М. Прохоров, Н.Г. Басов.

1.1. Принцип работы лазера

В 1916 году А. Эйнштейн предсказал, что переход электрона в атоме с более высокого энергетического уровня на расположенный ниже уровень при определенных условиях может инициироваться внешним электромагнитным полем, частота которого равна собственной частоте перехода. Возникающее при этом излучение называют **вынужденным** или **индуцированным**. Вынужденное излучение обладает удивительным свойством. Оно резко отличается от спонтанного (самопроизвольного) излучения. В результате взаимодействия возбуждённого атома с фотоном (квантом электромагнитного поля) атом испускает ещё один фотон той же самой частоты, распространяющийся в том же направлении. На языке волновой теории это означает, что возбуждённый атом излучает электромагнитную волну, у которой

частота, фаза, поляризация и направление распространения точно такие же, как и у первоначальной волны, под влиянием которой и произошло это излучение. В результате вынужденного испускания фотонов амплитуда распространяющейся в среде волны возрастает. С точки зрения квантовой теории в результате взаимодействия возбуждённого атома с фотоном, частота которого равна частоте перехода, появляются два совершенно одинаковых фотона-близнеца. Именно индуцированное излучение является физической основой работы лазеров.

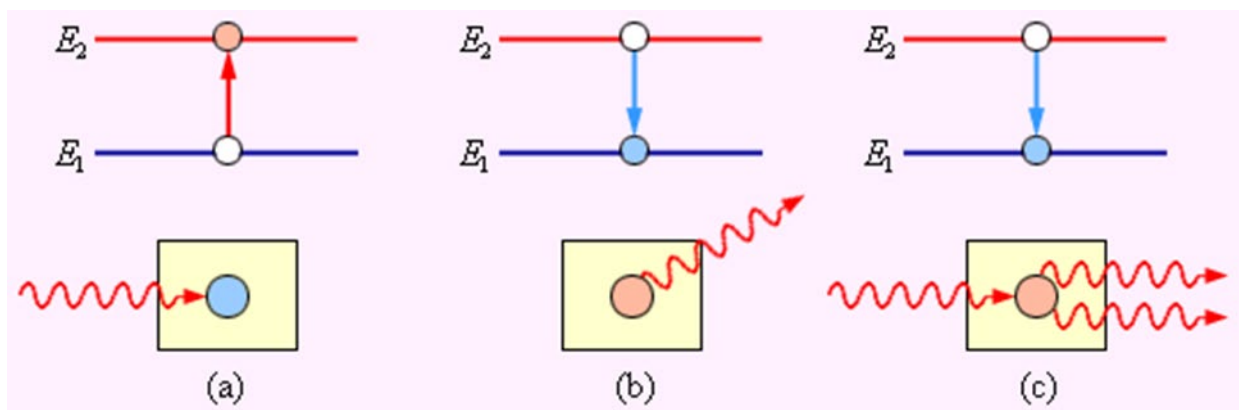


Рисунок 1. Условное изображение процессов (a) поглощения, (b) спонтанного испускания и (c) индуцированного испускания кванта света

Теодору Майману, калифорнийскому физику, в мае 1960 года удалось претворить эту идею в жизнь. Лазер, для реализации которого использовались кристалл рубина и резонатор Фабри – Перо, работал импульсно, длина волны составляла 694,3 нм.

В СССР также активно велись исследования по этой теме. В 1952 году два советских ученых – академик Александр Прохоров и его молодой сотрудник Николай Басов – выяснили, что возможно создание квантового генератора, который будет работать на аммиаке на тех же принципах, но не в оптическом, а микроволновом (СВЧ) диапазоне. Созданное устройство получило название мазер (где первая буква М происходит от английского слова Microwave).

Советские физики Александр Прохоров и Николай Басов в нашей стране известны как создатели лазера. За разработку работающего рубинового лазера в 1964 году им, а также американскому ученому Чарльзу Таунсу, присудили Нобелевскую премию по физике. Премию разделили, потому что советские ученые и Ч. Таунс занимались одними и теми же исследованиями параллельно, не имея возможности общаться и обмениваться научными достижениями из-за существовавшего в те годы «железного занавеса».

Лазерное излучение представляет собой вид электромагнитного излучения, генерируемого в оптическом диапазоне длин волн. Отличие его от других видов излучения заключается в монохроматичности (частоты испускаемых фотонов совпадают), когерентности (фазы колебаний электромагнитного поля совпадают) и высокой степени направленности (направления распространения фотонов также совпадают).

Любой лазерный генератор содержит три неотъемлемые части:

Активная среда – вещество, в котором возможно реализовать такое неравновесное распределение частиц (атомов, молекул, ионов) по энергетическим состояниям (уровням), чтобы хотя бы для одной пары уровней энергии выполнялось условие *инверсной заселённости уровней*, то есть более высокие энергетические состояния были бы более заселены, чем более низкие. Напомним, что в квантовом мире обычно чем меньше энергия системы, тем она более устойчива!

Источник накачки генерирует энергию, необходимую для обеспечения инверсной заселённости и стимулированного излучения в системе. Накачка может осуществляться различными способами, среди которых наиболее распространены возбуждение электрическим разрядом и оптическим излучением. Оптическая накачка возможна благодаря свету дуговых и газоразрядных ламп, излучению других лазеров и так далее.

Оптический резонатор – замкнутая система зеркал, обеспечивающая многократное прохождение рождённых фотонов через инверсно заселённую

активную среду, что приводит к их лавинному размножению. Именно эти «неразлично-одинаковые» фотоны и формируют монохроматический когерентный направленный лазерный пучок.

Роль оптического резонатора в лазере не ограничивается только обеспечением *положительной обратной связи*. Геометрия и общая длина одного прохода резонатора, а также кривизна и селективные отражающие свойства входящих в состав резонатора зеркал (и, возможно, других управляющих параметрами резонатора элементов) задают выходные пространственные, энергетические и временные параметры генерируемого лазерного излучения.

Пример простейшего конфокального резонатора показан на Рисунке 2.

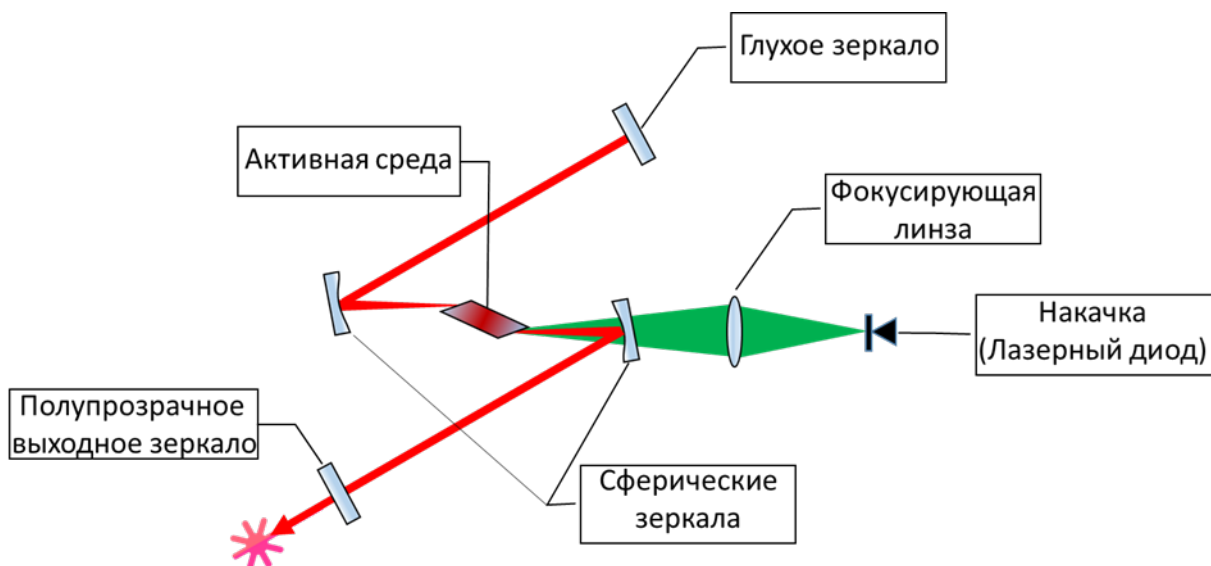


Рисунок 2. Оптическая схема активного конфокального резонатора.

1.2. Разновидности лазеров

В настоящее время существует классификация оптических лазерных генераторов по агрегатному состоянию лазерного активного вещества и способу его возбуждения:

Газовые – в которых активная среда формируется из газов или их смесей с очень низким давлением. Источником энергии выступает разряд электричества, производимый генератором высоких частот. Газовый генератор характеризуется непрерывностью излучения. В таких лазерах используется длинные стеклянные трубки с активной газовой средой, это связано с весьма невысокой плотностью газов.

Жидкостные – для создания активной среды применяют растворы органических соединений. Их плотность выше, чем плотность газа, и ниже, чем плотность твердых тел. Такие лазеры могут излучать до 20 Вт выходной мощности, при этом объём активного вещества остается сравнительно небольшим. Лазеры данного типа работают как в импульсном, так и в непрерывном режимах. В качестве источника накачки используют импульсные лампы или другие внешние лазеры.

Полупроводниковые – в качестве активной среды используют кристалл полупроводника. От всех остальных лазеров они отличаются тем, что излучательные переходы здесь происходят не между уровнями атомов или ионов, а между энергетическими зонами полупроводникового кристалла. При этом активными частицами вещества являются сами электроны. Накачка таких генераторов осуществляется импульсным или постоянным электрическим током, а миниатюрный оптический резонатор (длина резонатора лежит в микронном диапазоне) может быть образован естественными сколами самого полупроводникового кристалла.

Твердотельные – в качестве активной среды используются кристаллические или аморфные твердые среды, активированные различными ионами, а источниками энергии могут служить импульсные газоразрядные

лампы или дополнительные внешние лазеры. В зависимости от типа активного элемента лазерное излучение генерируется с различной эффективностью и на разных длинах волн.

Существуют активные среды, позволяющие обеспечить генерацию лазера в широком спектральном диапазоне. Некоторые из активных сред представлены на Рисунке 3. Активные среды систематизированы по минимальным длинам волн, которые они способны генерировать. Ширина чёрного прямоугольника соответствует диапазону возможной перестройки генерируемой длины волны. Титан-сапфировые лазеры могут перестраиваться в области длин волн 650 – 1100 нм, которая является практически самой широкой из представленных на рисунке активных сред.

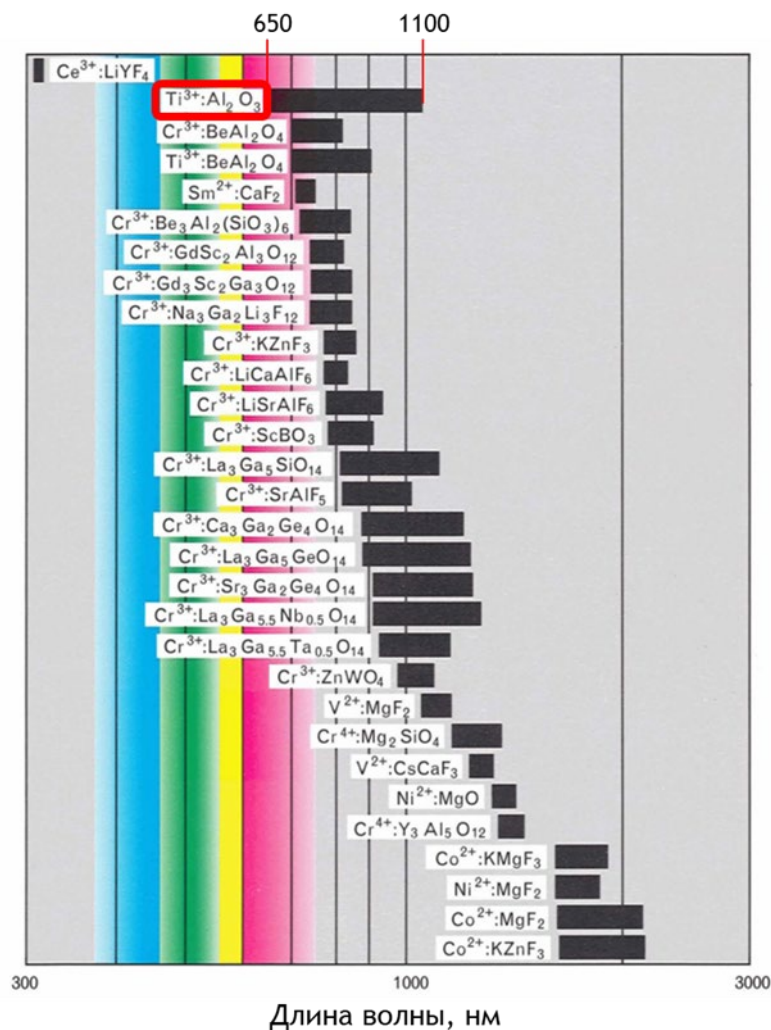


Рисунок 3. Активные среды твердотельных лазеров с перестраиваемой длиной волны

2. Актуальность и значимость проекта

Твердотельные титан-сапфировые лазеры [1–2] остаются популярным и широко распространённым источником когерентного света для научных исследований, медицинских и технологических приложений, включая нелинейную оптику, физику плазмы, фемтохимию, многофотонную визуализацию биологических объектов, лазерную хирургию, микрообработку различных материалов и так далее. Благодаря чрезвычайно широкой полосе усиления 650–1100 нм кристалл оксида алюминия, легированного титаном ($\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$), пользуется большим спросом в качестве активной среды для создания как перестраиваемых непрерывных лазеров, так и импульсных лазеров с синхронизацией мод, дающих импульсы длительностью короче 5 фс (10^{-15} с).

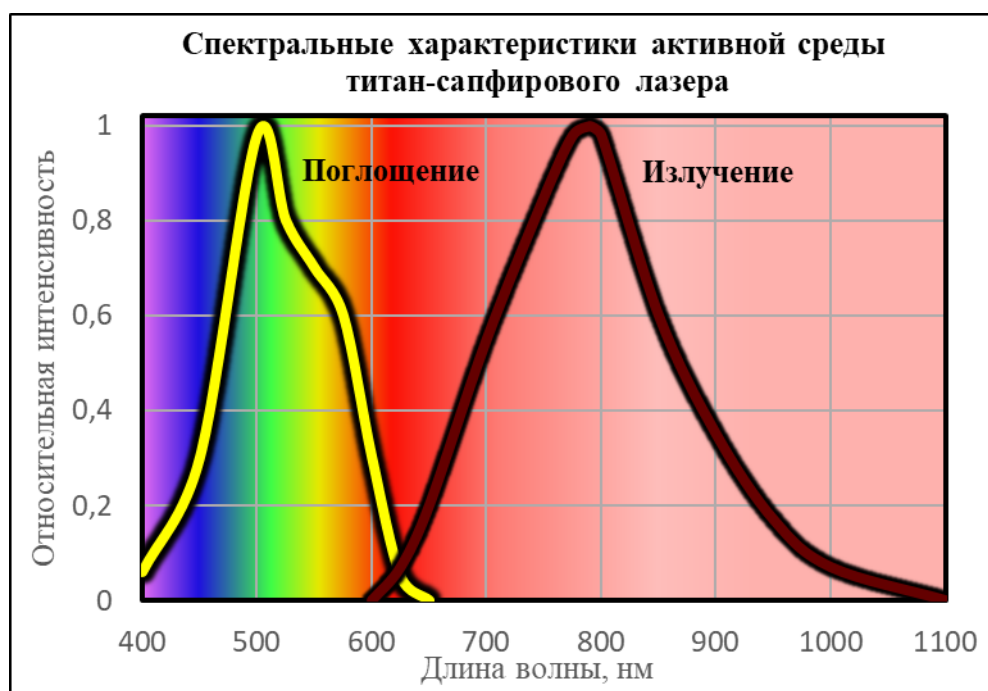


Рисунок 4. Спектральные характеристики $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$

$\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ эффективно поглощает в спектральном диапазоне от 450 до 550 нм, что соответствует сине-зелёной части видимого спектра. Спектроскопические особенности этой активной среды позволяют утверждать, что для её накачки хорошо подходит линейно-поляризованное лазерное излучение [3–4]. В первых титан-сапфировых лазерах для накачки использовались аргоновые (газовые) лазеры с длинами волн 488 и 514 нм.

Позднее для накачки стали использовать более компактные непрерывные неодимовые лазеры с внутрирезонаторным удвоением частоты (532 нм) или иттербиевые с предварительным удвоением частоты (525 нм). То есть, во всех вышеперечисленных случаях, для накачки титан-сапфировых лазерных систем использовался один из перечисленных или иной достаточно сложный и прецизионный дополнительный лазерный источник излучения. Это приводило к кратному усложнению и соответствующему удорожанию титан-сапфировых лазерных систем.



Газовый аргоновый лазер.

Твердотельный лазер с
внутрирезонаторным
удвоением частоты.

Лазерный диод

*Рисунок 5. Различные типы лазеров, применимые для накачки
титан-сапфировой активной среды.*

Ситуация изменилась с появлением доступных и недорогих сине-зелёных лазерных светодиодов [5], за разработку которых Исама Акасаки, Хироси Амано и Сюдзи Накамура были удостоены Нобелевской премии по физике в 2014 году. Сине-зелёные лазерные светодиоды способны излучать на длинах волн в диапазоне 450 – 550 нм, что делает их потенциально пригодными для создания титан-сапфирового лазера с прямой диодной накачкой [6–7]. Данный подход делает конструкцию лазера более простой и надёжной. Уменьшаются габаритные размеры и чувствительность к воздействиям окружающей среды, что в свою очередь расширяет область применения подобных лазеров. Эти очевидные преимущества делают тематику данного проекта весьма актуальной. Работа в этом направлении открывает перспективы создания компактных, недорогих и энергоэффективных твердотельных лазерных систем на титан-сапфире (в том числе и импульсных – фемтосекундных) с прямой диодной

накачкой. Уже сегодня они могут быть использованы, как составные части медицинских или производственных установок.

3. Цель проекта

Целью работы является создание макета перестраиваемого в широком спектральном диапазоне мощного лазера на кристалле титан сапфира $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ с применением инновационного метода прямой накачки активной среды при помощи мощных лазерных диодов, излучающих на длинах волн в синем (445 – 470 нм) и зелёном (520-532 нм) спектральных диапазонах.

4. Практическая часть

4.1 Блок питания и управления лазерными диодами

Для работы лазерных диодов накачки на них необходимо подать напряжение, обеспечивающее стабильный оптимальный для данных диодов ток, и контролировать их температуру, чтобы избежать перегрева. Для этого был использован набор доступных модулей, которые были размещены на объединяющей металлической пластине, помещённой внутрь стандартного корпуса. В результате получился представленный на рисунке ниже вполне законченный блок управления и контроля параметров лазерных диодов.

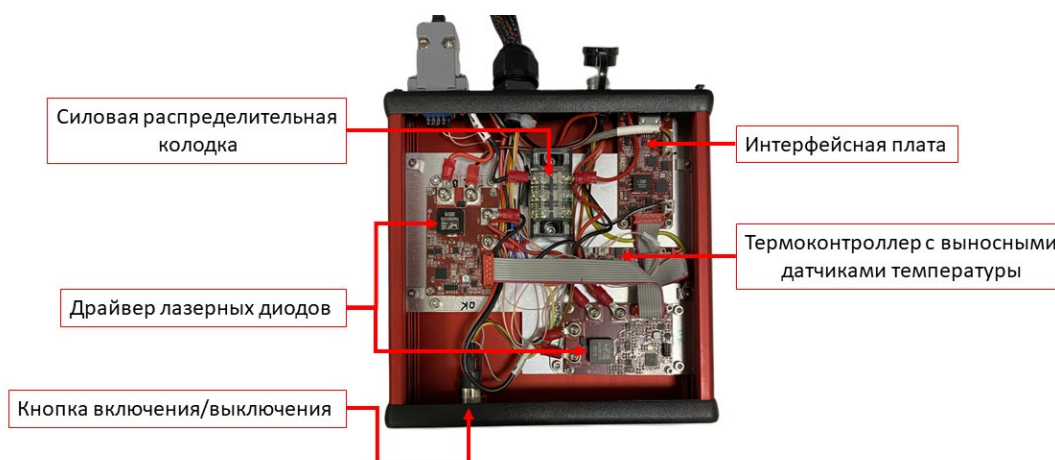


Рисунок 6. Блок питания и управления лазерными диодами

Блок питания и управления диодами накачки включал в себя следующие основные элементы: два драйвера диодов, систему наблюдения за температурой диода (термоконтроллер с выносными термодатчиками) и интерфейс взаимодействия с компьютером.

Используемые драйверы диодов – это источники постоянного тока, линейные, бесшумные и точные, которые обеспечивают постоянное значение тока, подаваемого на лазерные диоды. В работе использовалось 2 таких драйвера, так как специфицируемые токи выбранных нами диодов были различными (для диода 525 нм максимальный ток составлял 2А, а для диодов 455 нм и 465 нм – 3А). Диоды на 465 нм и 455 нм были подключены последовательно к одному драйверу. Драйверы позволяют плавно регулировать

ток в диапазоне от 0 до 3.5 А и поддерживать установленный ток с точностью не хуже 0,001 А.

При повышении тока температура лазерных диодов сильно возрастала, что могло привести к выходу диодов из строя. Постоянный контроль за температурой диодов осуществлял термоконтроллер с выносными термодатчиками температуры. Плата термоконтроллера позволяла одновременно подключить до 4 выносных датчиков. Выносные датчики приклеивались термостепляющей лентой непосредственно к задней стенке диодов (Рисунок 6).

Объединение всех плат в единую систему выполнялось при помощи интерфейсной платы, обеспечивающей взаимодействие с компьютером.

Управление режимами работы диодов, установка текущего значения токов, включение и выключение, и контроль температур осуществлялся непосредственно с компьютера через интерфейс USB при помощи управляющей программы.

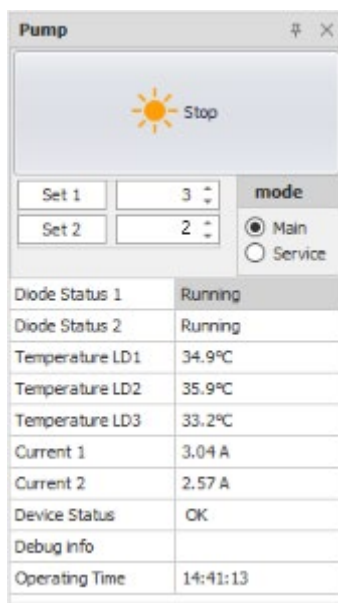


Рисунок 7. Вид окна программы, управляющей режимами работы диодов

4.2 Техническое исполнение сборки держателя диодов

Для реализации проекта необходимо было установить лазерные диоды в жёсткие держатели и обеспечить от них хороший теплоотвод, так как при больших токах они нагреваются до температуры 100°C всего за несколько минут. Для удобства установки диодов в оптическую схему и обеспечения отвода тепла была спроектирована, начерчена и изготовлена конструкция держателя, 3D модель которой представлена на рисунке 8.

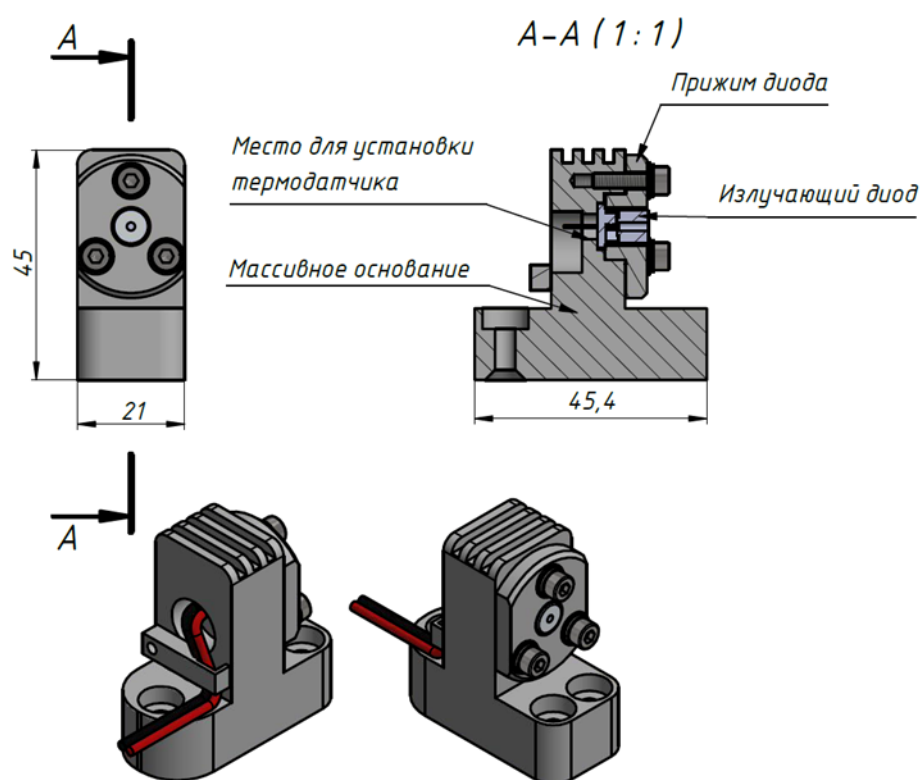


Рисунок 8. Модель держателя лазерного диода

В эксперименте предполагалось использовать три диода. Их необходимо было расположить на единой охлаждаемой монтажной плите. Конструкция термостабилизированной плиты также была спроектирована (см. 3D-модель сборки на рисунке 10), начерчена и изготовлена. Для съёма тепла от всей сборки в основании были предусмотрены сквозные отверстия и через них был обеспечен проток охлаждающей жидкости при помощи системы охлаждения и поддержания температуры замкнутого цикла (чиллера). При поддержании температуры охлаждающей жидкости на уровне $(21 \pm 1)^\circ\text{C}$ удалось добиться того, чтобы рабочие температуры лазерных диодов не выходили за рамки

специфицируемых производителем. При подборе рабочего режима были измерены зависимости температуры диодов от величины протекающего тока, одна из которых представлена на рисунке 9 ниже.

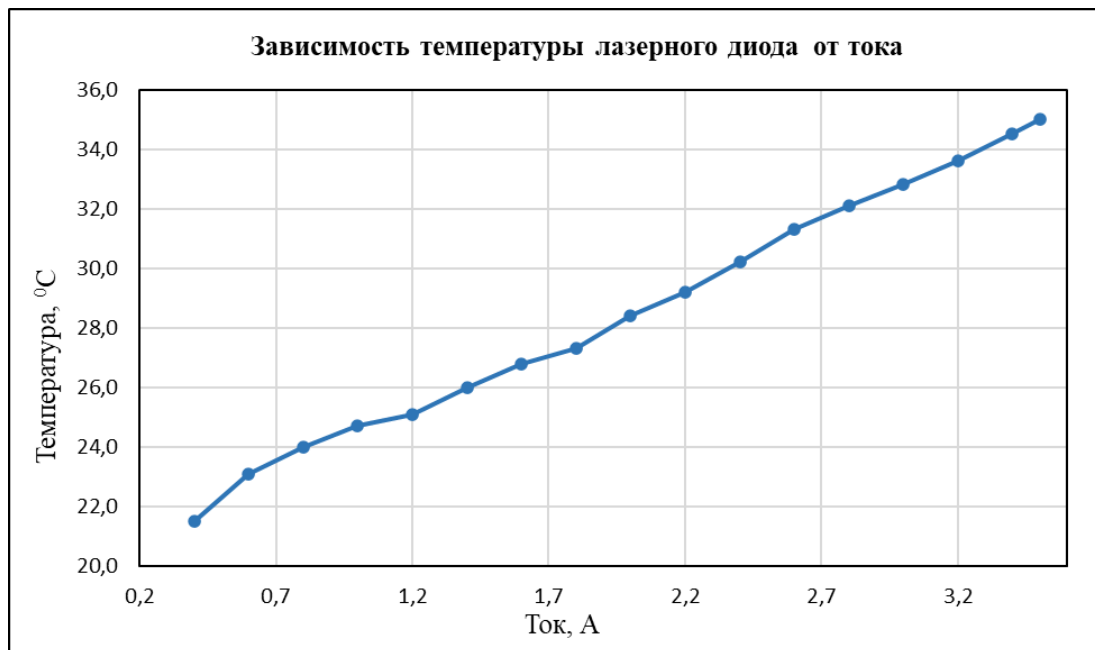


Рисунок 9. Зависимость температуры лазерного диода от величины тока

Стойки с излучающими диодами

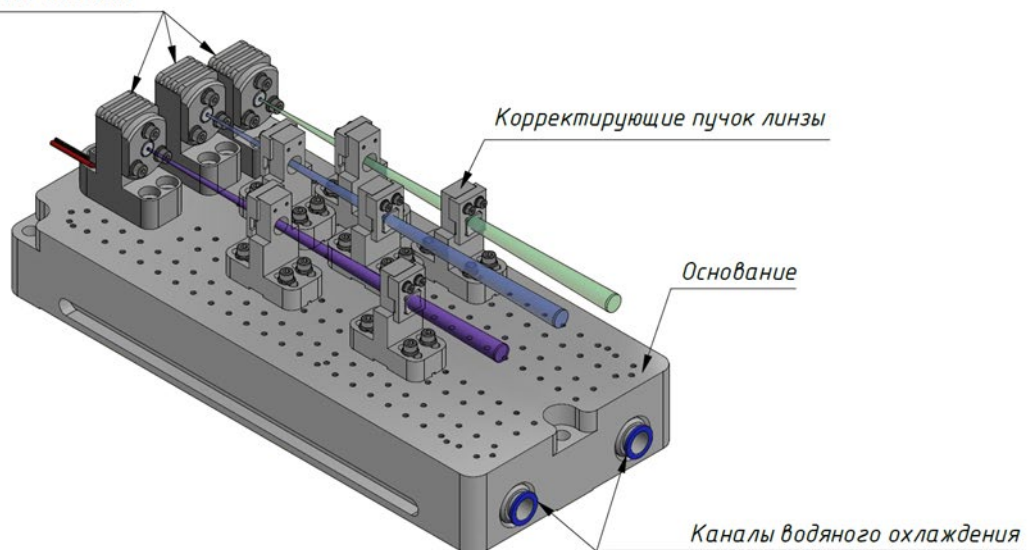


Рисунок 10. Модель сборки трех диодов с корректирующими линзами на термостабилизированной плате

4.3 Характеристики используемых диодов

Для проектной работы были выбраны три типа доступных на сегодняшний день высокомоощных сине-зелёных лазерных диодов, генерирующих на трёх различных длинах волн, попадающих в диапазон поглощения титан-сапфира. При помощи спектрометра были определены реальные центральные длины волн спектров излучения этих диодов (при фиксированной рабочей температуре). Полученные спектры приведены на графике ниже (рисунок 11). Также был измерен спектр поглощение подготовленного кристалла титан-сапфира в интересующем нас диапазоне длин волн (жёлтая кривая нормированного спектра поглощения приведена на том же графике).

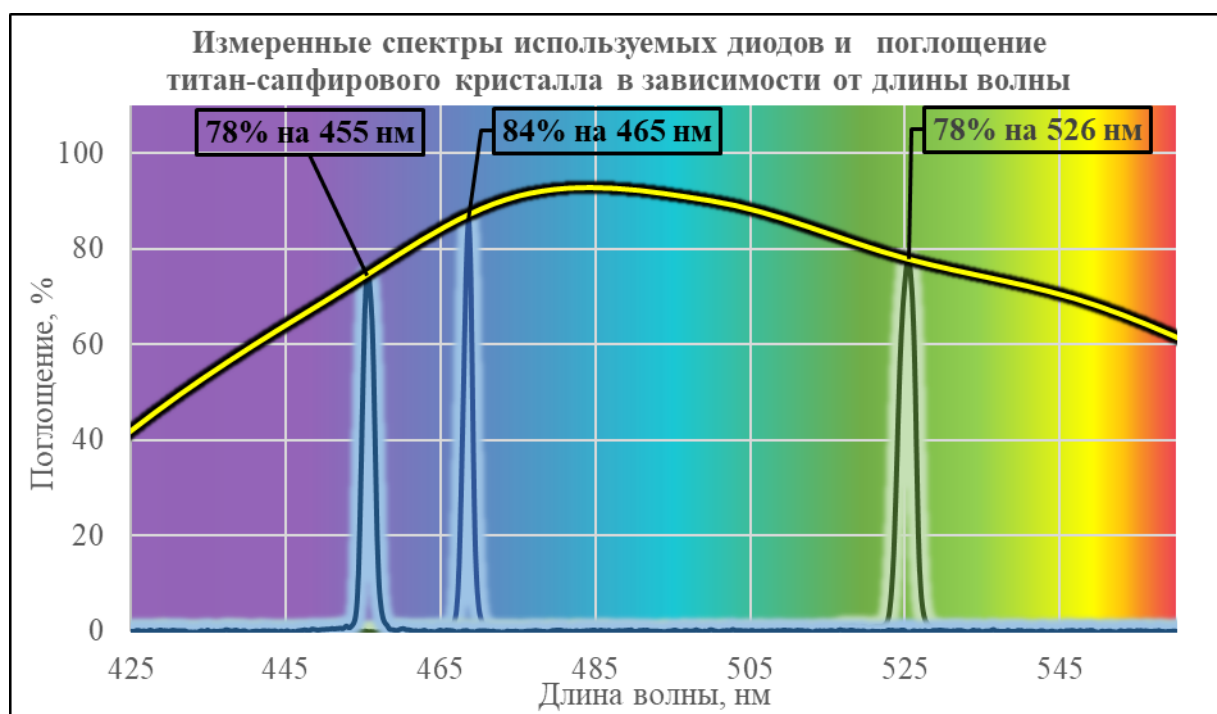


Рисунок 11. Измеренные спектры используемых диодов и поглощение титан-сапфирового кристалла в зависимости от длины волны

Из проделанных измерений видно, что поглощение составляет для всех трех диодов более 78%, что говорит о том, что выбранные диоды с длинами волн 455, 465 и 526 нм можно использовать для накачки титан сапфирового лазера.

Как уже отмечалось ранее, для оптической накачки титан-сапфирового лазера помимо длины волны важное значение имеет поляризация излучения источника накачки.

Поляризация является одним из важных свойств света как электромагнитной волны. Чтобы примерно представить, как проявляется это свойство, рассмотрим вначале аналогичное свойство механических волн. Перемещая туда-сюда рукой конец упругого шнура хаотично, не придерживаясь никакого определенного направления, можно возбудить в нем колебания, которые быстро будут менять свое направление в пространстве. Если мы пропустим этот шнур через узкую щель, то за щелью останутся только колебания в одной плоскости, совпадающей со щелью. В этом случае бегущая за щелью волна будет называться плоскополяризованной. На рисунке ниже представлен пример такой волны, поляризованной в вертикальной плоскости.

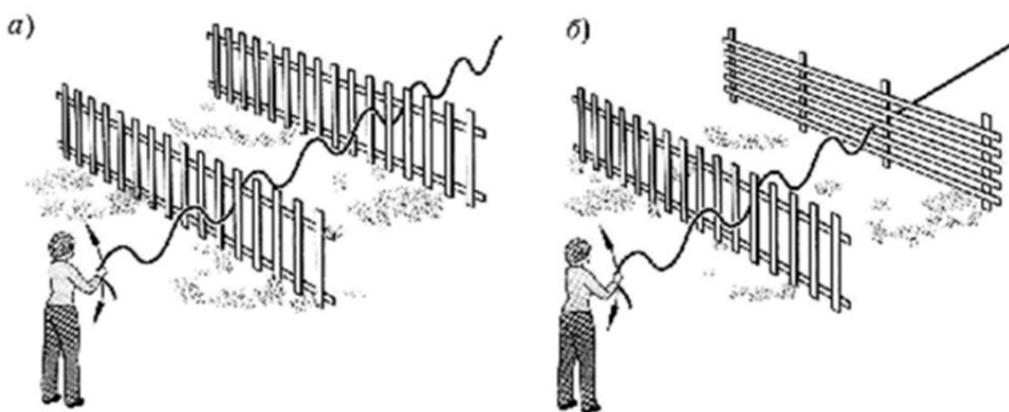


Рисунок 12.

а) Если брусья заборов будут вертикальны и параллельны друг другу, колебания будут проходить полностью. Полное прохождение волны.

б) Если брусья заборов будут перпендикулярны друг другу, то после второго забора колебания полностью погасят и прохождение вертикально поляризованной волны сквозь препятствие окажется невозможным.

Не вдаваясь в рамках данного проекта в физические причины явлений, приводящих к той или иной поляризации излучения лазерных диодов, отметим лишь, что излучение всех трёх типов выбранных нами лазерных диодов оказалось плоскополяризованным, в чем мы смогли убедиться экспериментально, наблюдая за прохождением их излучения через поляризатор при его вращении. Исходя из этого факта при монтаже лазерных диодов в

держатели важно было установить их таким образом, чтобы направление поляризации излучения находилось в горизонтальной плоскости. Для этого после диода устанавливался поляризатор таким образом, чтобы пропускать только вертикальную поляризацию и, вращая лазерный диод в держателе вокруг своей оси, мы добивались полного гашения прошедшего излучения. Полное гашение означало, что поляризация повернута ровно на 90 градусов и её плоскость горизонтальна. В таком положении диоды жестко фиксировались прижимными кольцами.

В ходе проектной работы так же были измерены мощностные характеристики диодов в зависимости от протекающего через них тока.

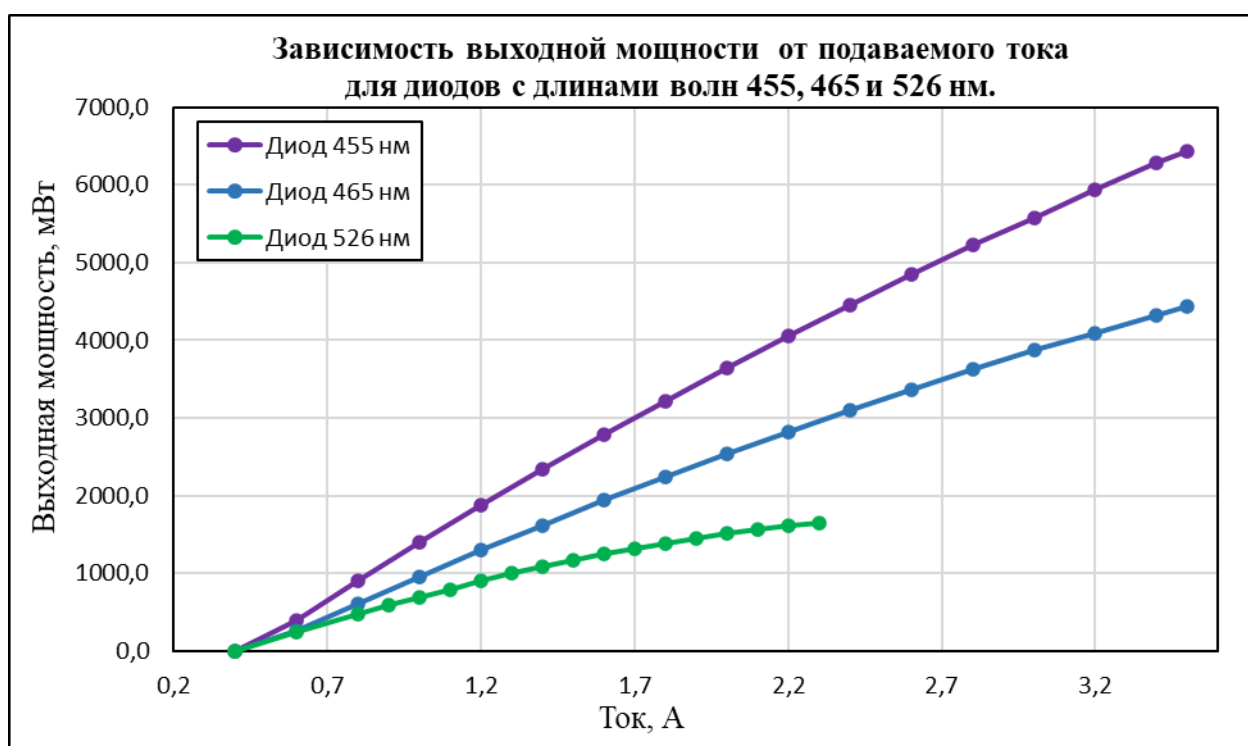


Рисунок 13. Зависимость выходной мощности излучения от тока через диод для диодов трёх типов

В лазере на основе $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ активной среды для обеспечения стабильной работы излучателя путём насыщения инверсии населённостей необходима остро сфокусированная в кристалл продольная оптическая накачка высокой мощности (более 3 Вт). Проведенные нами измерения показали, что при рабочих токах диодов (3А для диодов 455 нм и 465 нм, 2А для диода 526 нм) удаётся получить

суммарную выходную мощностью сборки из трёх диодов более 10 Вт. Однако надо учесть, что качество пучка у лазерных диодов значительно хуже, чем у традиционно используемых для накачки титан-сапфира внешних лазеров.



Рисунок 14. Качество пучков различных источников накачки

Для коррекции астигматизма и расходимости пучков лазерных диодов в схеме для каждого диода был установлен телескоп 3,2:1.

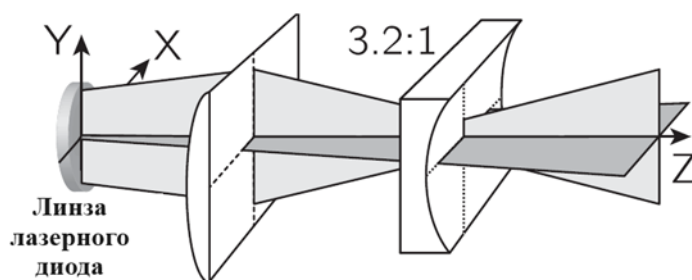
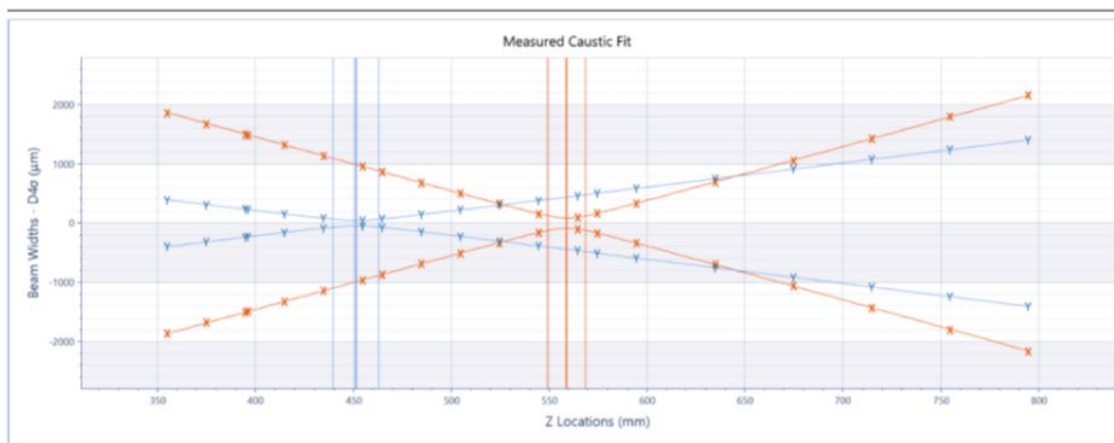
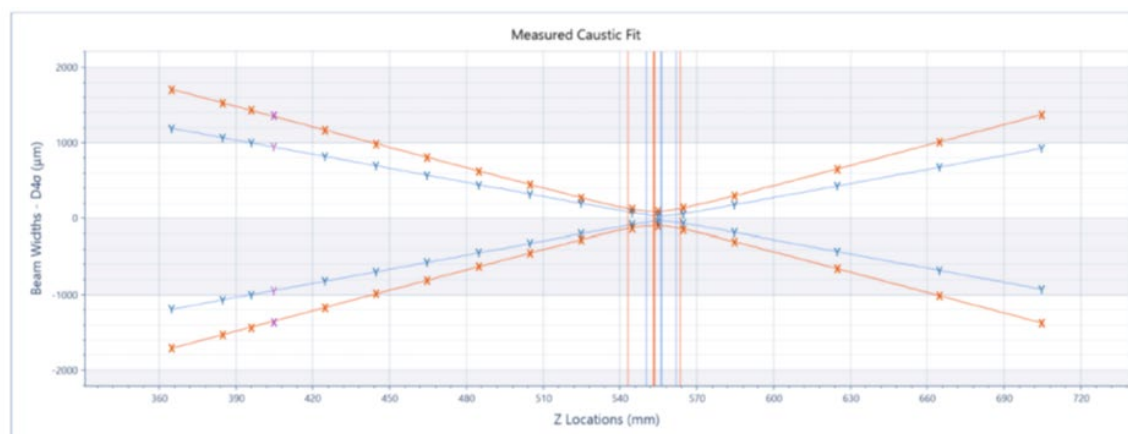
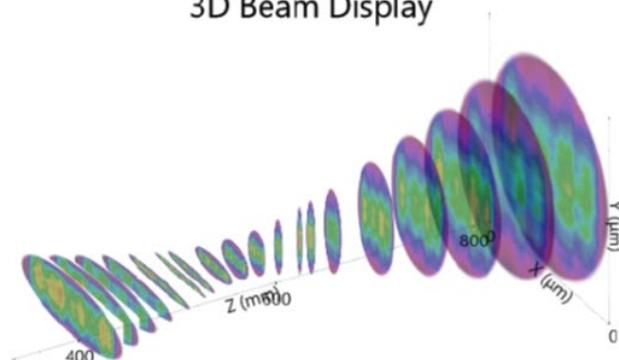


Рисунок 15. Линзовый телескоп

Каждый телескоп состоял из плоско-выпуклой и плоско-вогнутой корректирующих цилиндрических линз, закреплённых на держателях, которые имели возможность переставляться вдоль оптической оси. Разработанная конструкция из двух тщательно подобранных для каждого диода цилиндрических линз позволила регулировать расходимость пучков лазерных диодов в плоскости быстрой оси независимо от плоскости медленной оси путём перемещения плоско-вогнутой линзы, добиваясь максимального согласования перетяжек по двум осям. Контроль измеренных параметров пучков без телескопа и с его использованием проводился при помощи системы точного анализа характеристик каустики сфокусированного излучения “BEAM SQUARED” от компании “Spiricon”. Также телескопом была подправлена и форма пучка: он стал ближе к квадратной форме, а значит, сфокусировавшись в активном элементе, будет иметь лучшее перекрытие с пучком генерации в резонаторе.



3D Beam Display



3D Beam Display

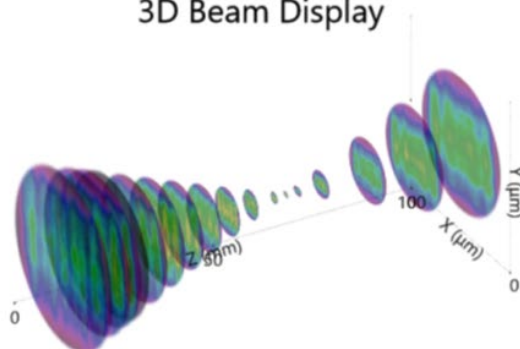


Рисунок 16.

А) Перетяжки без телескопа.

Б) Совмещенные по двум осям перетяжки с использованием телескопа.

4.4 Схема установки

На базе комплекта оптических и механических компонентов, содержащего всё необходимое для создания различных конфигураций твердотельного лазера на кристалле титан-сапфира, был собран макет. Макет позволял производить накачку активного элемента различными способами и типами лазерных источников. Схема установки приведена на Рисунке 17.

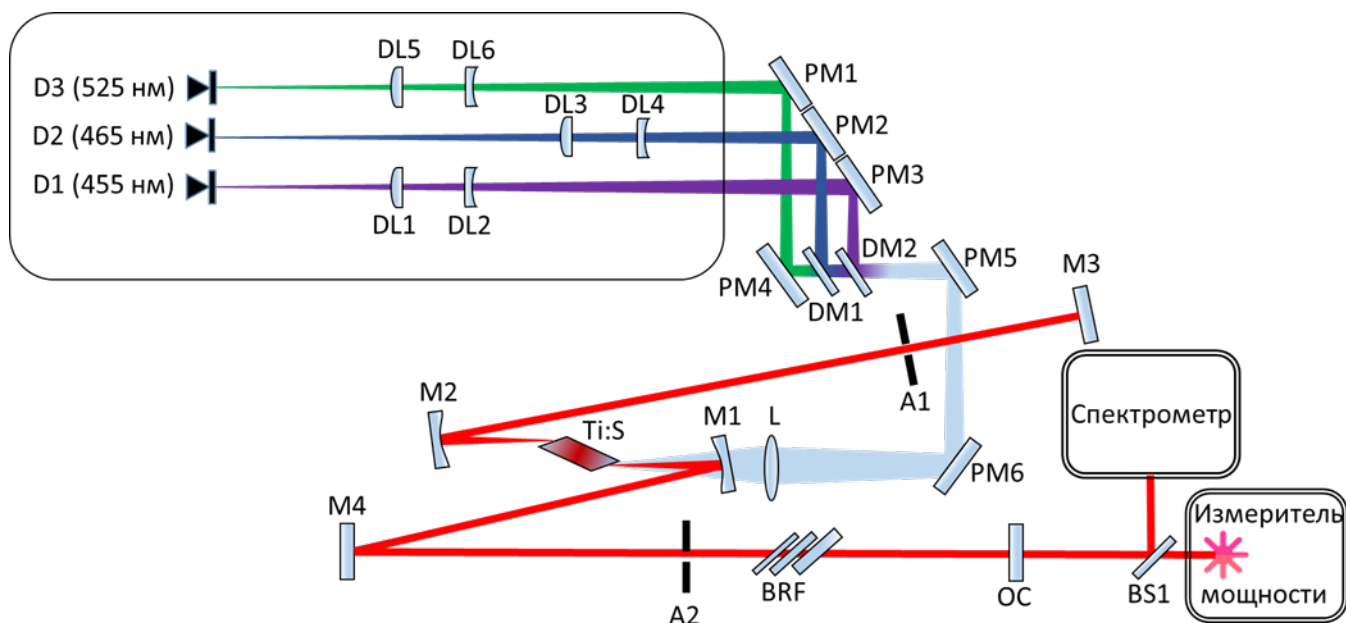


Рисунок 17. Схема установки

- D1, D2, D3 – диоды накачки;
- DL1, DL2, DL3, DL4, DL5, DL6 – формирующие пучок диодов накачки линзы;
- PM1, PM2, PM3, PM4, PM5, PM6 – поворотные зеркала излучения накачки;
- DM1, DM2 – дихроичные зеркала;
- M1, M2 – сферические зеркала;
- M3, M4 – глухие зеркала резонатора;
- Ti:S – кристалл активной среды;
- L – фокусирующая накачку линза;
- OC – выходное зеркало;
- A1, A2 – диафрагмы;
- BRF – двулучепреломляющий фильтр ЛИО;
- BS1 – делитель пучка.

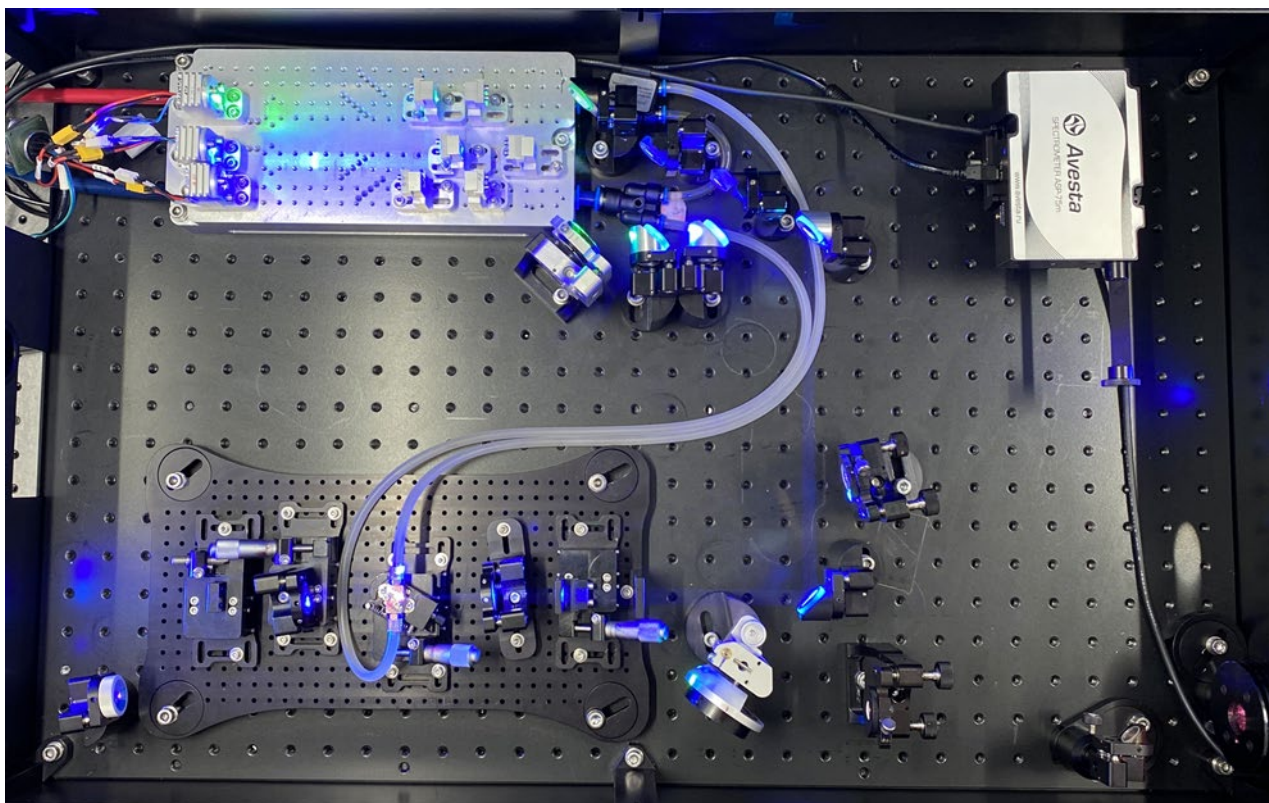


Рисунок 18. Фотография установки

Созданная оптическая схема содержала ряд зеркал PM1 - PM6 и дихроичных зеркал DM1 - DM2, формирующих единый мультилуч диодов накачки (455, 465 и 526 нм) большой мощности (в сумме более 10 Вт) и заводящих его в резонатор лазера. Зеркала PM1-PM6 имели коэффициент отражения $>99,5\%$ в диапазоне длин волн 440 – 550 нм. Дихроичное зеркало DM1 имело пропускание на длину волны 525 нм и отражение на длину волны 465 нм. Дихроичное зеркало DM2 имело пропускание на длины волны > 460 нм и отражение на длину волны 455 нм. Спектральные характеристики специально изготовленных для проекта дихроичных зеркал приведены на рисунках 19 и 20.

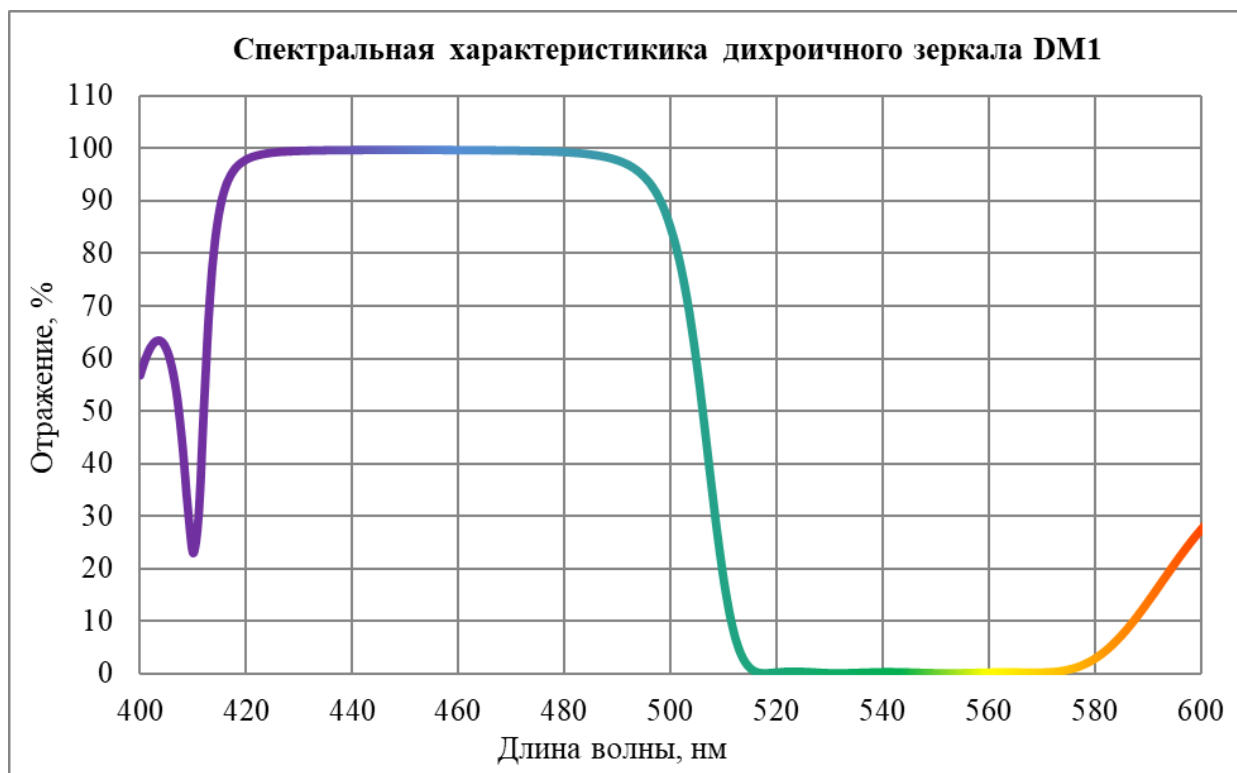


Рисунок 19. Спектральная характеристика дихроичного зеркала DM1.

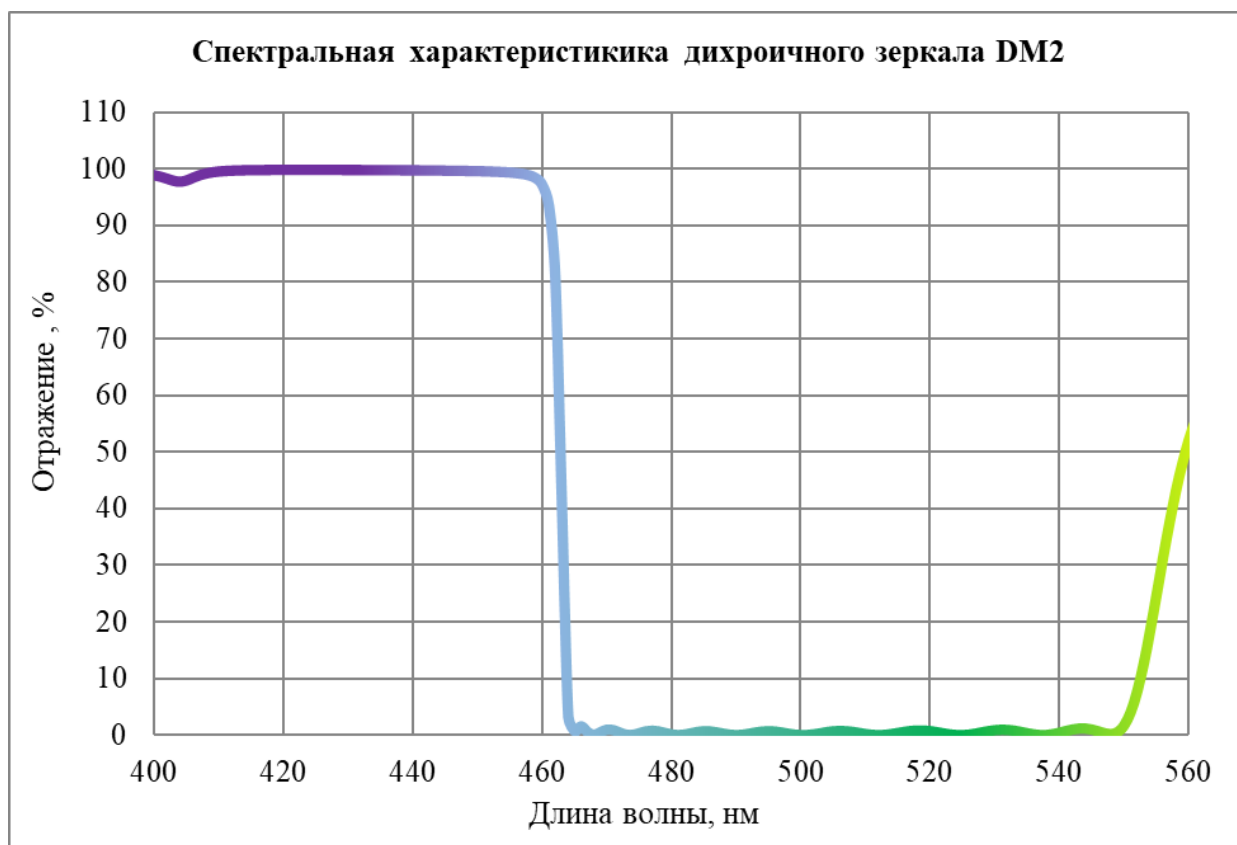


Рисунок 20. Спектральная характеристика дихроичного зеркала DM2.

Для самого титан-сапфирового лазера была использована классическая схема z-образного резонатора. Резонатор лазера содержал два сферических зеркала M1 и M2 и плоские зеркала M3, M4 с широкополосными диэлектрическими покрытиями. Коэффициент отражения зеркал резонатора составлял более 99,9%. Зеркала M1 и M2 имели пропускание для длин волн диодов накачки (440-550 нм). Зеркала M1 и M2, через которые пучок диодов накачки проходит к кристаллу, также имели просветляющее покрытие с нерабочей стороны (относительно резонатора) для пропускания пучка накачки и минимизации потерь. Спектральные характеристики резонаторных зеркал приведены на рисунке 21.

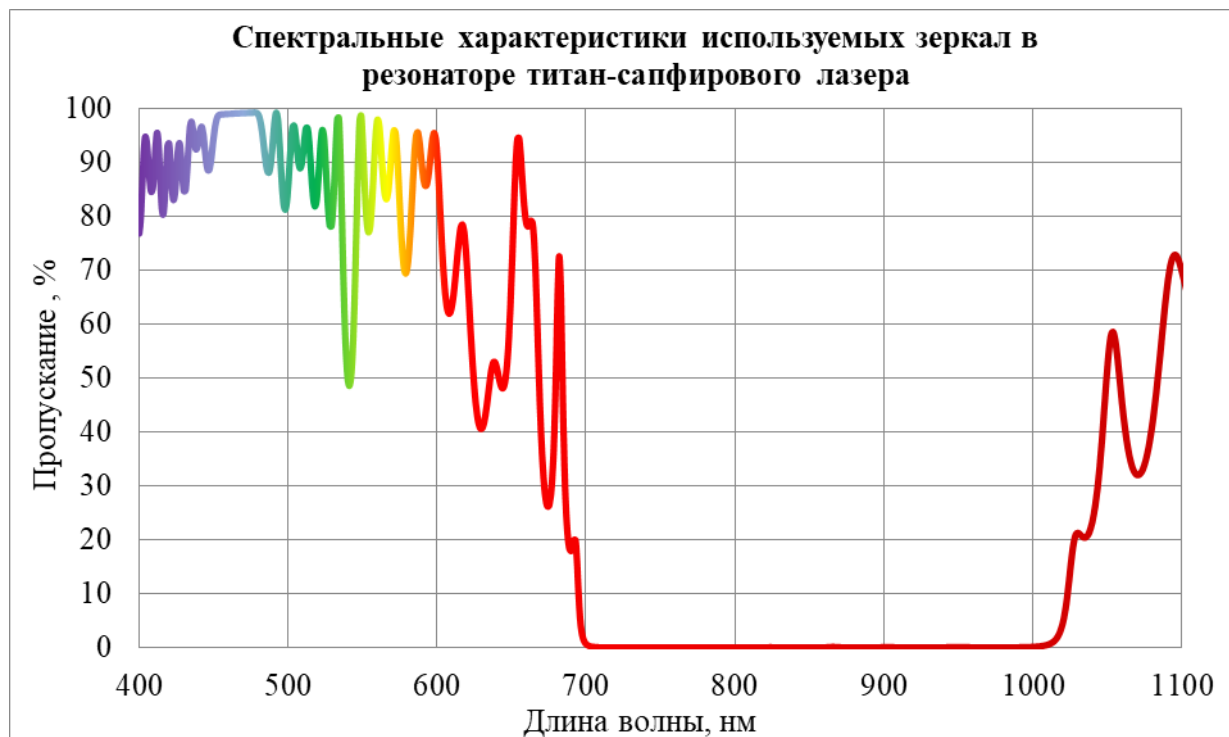


Рисунок 21. Спектральные характеристики используемых зеркал в резонаторе титан-сапфирового лазера

Выходное зеркало резонатора ОС полупрозрачное. Пропускание выходного зеркала оптимизируется от 2% до 20% в зависимости от мощности накачки, заведённой в резонатор. Выбор пропускания выходного зеркала проводился путём подбора, каждый раз с проведением настройки резонатора на максимальную мощность. В результате для 10 Вт суммарной накачки, выбрано было зеркало с пропусканием порядка 6% на 800 нм.

Кристалл сапфира TiS , активированный ионами Ti^+ , для минимизации вносимых потерь в резонаторе на рабочих длинах волн был вырезан под углом Брюстера и был установлен в латунном держателе с водяным охлаждением, чтобы избежать его локального нагрева и появления тепловой линзы. Фокусировка излучения диодов накачки проводилась с использованием короткофокусной линзы L (короче $f=100$ мм). Для минимизации потерь накачки все линзы, используемые в работе, были просветлены с двух сторон на длины волн лазерных диодов.

Так же резонатор лазера включал в себя двулучепреломляющий фильтр Лию (BRF), который выполнял роль спектрально-селективного элемента и обеспечивал управляемую ступенчатую перестройку длины волны излучения лазера.

Расположение пучка люминесценции в резонаторе задавалось вкручиваемыми диафрагмами $A1$ и $A2$. Диафрагма $A1$ располагалась в глухом плече и задавала в нем координаты и углы пучка люминесценции. Диафрагма $A2$ располагалась в резонаторе перед выходным зеркалом ОС и задавала положение выходного пучка лазера. Данные диафрагмы предназначены для проверки юстировки резонатора или юстировки резонатора «с нуля».

4.4 Измерение параметров выходного излучения

титан-сапфирового лазера

Излучение титан-сапфирового лазера, покидая резонатор через выходное зеркало ОС, проходит через фильтр-делитель BS1, где малая его часть отщепляется и заводится в спектрометр для контроля и измерения длины волны выходного излучения, а основной пучок попадает в измеритель мощности. При помощи спектрометра и измерителя мощности была измерена зависимость мощности от длины волны для одного, двух и трёх лазерных диодов накачки (Рисунок 22). Таким образом была получена эффективность преобразования мощности накачки диодами в выходную мощность титан-сапфирового лазера порядка 17%.

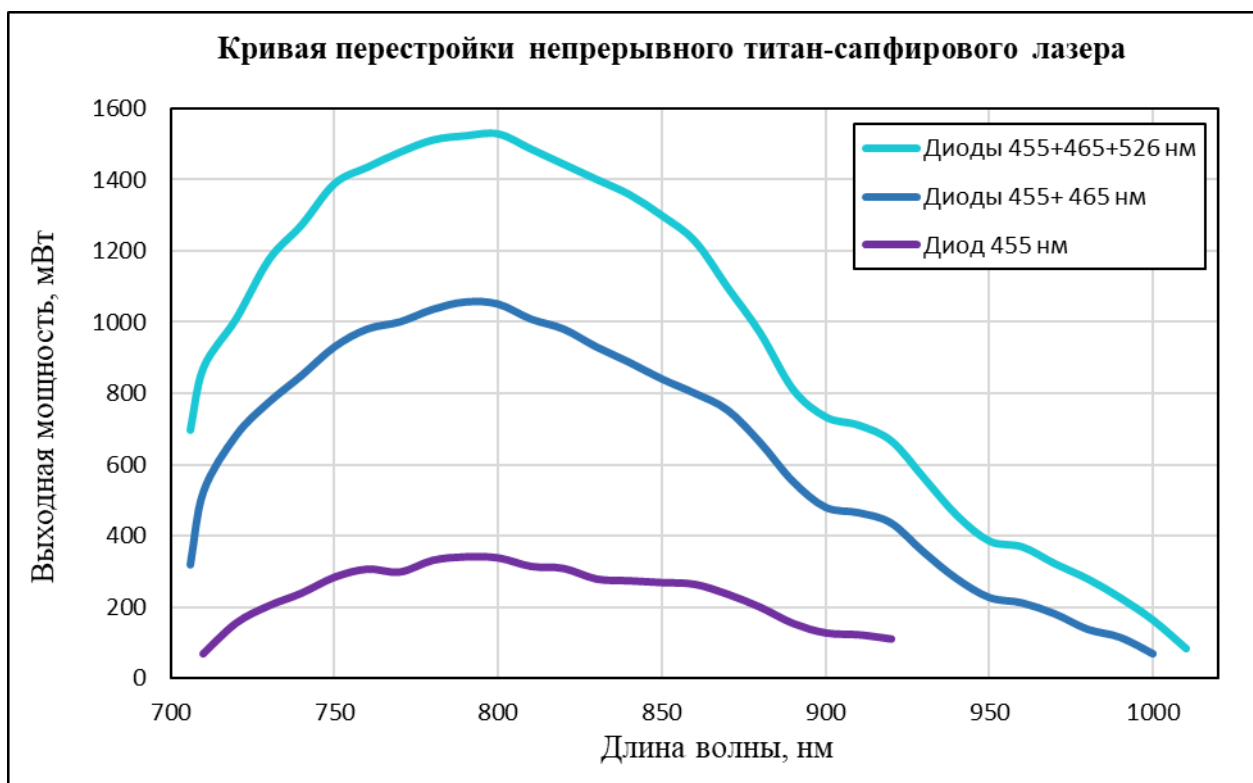


Рисунок 22. Кривая перестройки непрерывного титан-сапфирового лазера.

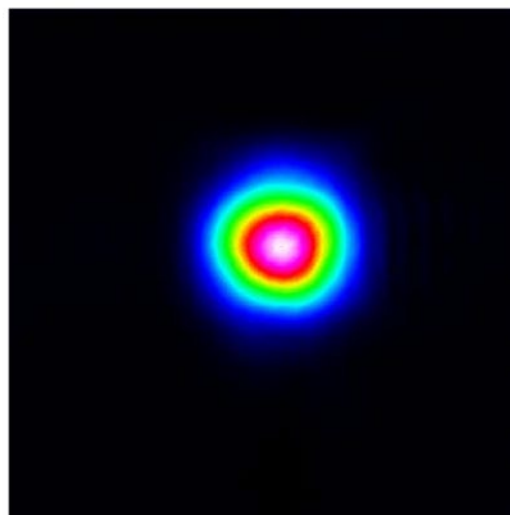
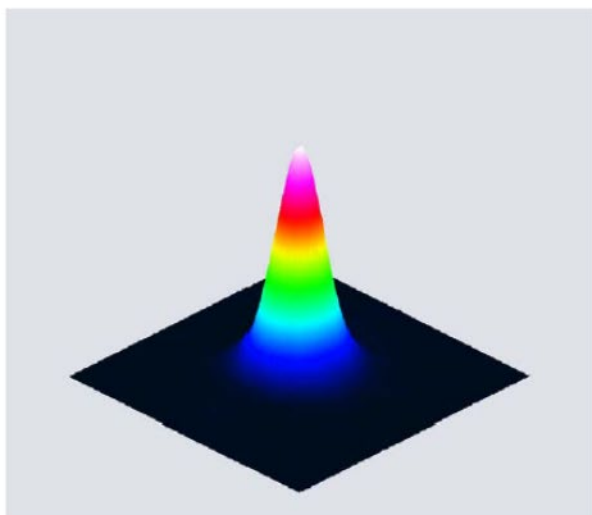
При помощи специальной камеры (BEAMAGE-4M) компании Gentec было измерено качество пучка титан-сапфирового лазера. Основные параметры пучка приведены на рисунке 23. Из полученных результатов видно, что несмотря на сильно отличную от круглой форму пучков лазерных диодов на выходе из титан-сапфирового лазера получается круглый пучок с малой эллиптичностью.



BEAMAGE-4M

Wednesday, December 06, 2023

gentec-eo
PARTNERS for ACCURACY



PARAMETERS

Beam Diameter : 4 Sigma (ISO)

MEASUREMENTS

Axis (dSigma X, dSigma Y): (1905.3, 1866.5) μm

Effective Diameter: 1886.0 μm

Ellipticity: 98.0 %

Orientation: 12.5 degrees

Рисунок 23. Пучок на выходе титан-сапфирового лазера

5. Анализ полученных результатов

Экспериментально продемонстрирована возможность эффективной замены лазеров с внутрирезонаторным удвоением частоты, используемых ранее для накачки титан-сапфировых лазеров, мощными недорогими компактными лазерными диодами.

В результате работы был создан прототип мощного непрерывного перестраиваемого лазера на титан-сапфире с возможностью перестройки длины волны от 710 до 1000 нм (диапазон перестройки был ограничен спектром отражения используемых в данном макете зеркал).

Используемый в работе метод спектрального сведения пучков нескольких лазерных диодов позволил достичь мощностей, превышающих 1,5 Вт, которая, по мнению авторов, является одной из самых высоких полученных в мире на сегодняшний день.

В работе продемонстрировано, что использование диодов требует минимальных изменений в оптической схеме самого титан-сапфирового лазера.

Дальнейшая работа в этом направлении открывает перспективы создания компактных, недорогих и энергоэффективных твердотельных лазерных систем на титан-сапфире (в том числе и импульсных – фемтосекундных) с прямой диодной накачкой для самых разных практических применений в биомедицине, метрологии, квантовой оптике и нанобработке материалов, а также в фундаментальных научных исследованиях. Титан-сапфировые лазеры с диодной накачкой становятся не только лабораторным источником излучения, но и уже могут быть использованы как составные части медицинских или производственных установок.

6. Перспективы развития

Основные направления развития данной работы:

1. Дальнейшая оптимизация и создание малогабаритных модулей прямой комбинированной диодной накачки.
2. Разработка компактных недорогих и энергоэффективных твердотельных лазерных систем с прямой диодной накачкой на титан-сапфире с широким диапазоном перестройки по длине волны, работающих в различных режимах:
 - непрерывном;
 - импульсном, включая режим генерации фемтосекундных импульсов.

7. Список используемой литературы:

1. Крюков, П. Г. Лазеры ультрокоротких импульсов и их применения : учебное пособие / П.Г. Крюков. - Долгопрудный : Интеллект, 2012, - 248 с.
2. D. E. Spence, P. N. Kean, and W. Sibbett, "60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser," Opt. Lett. 16, 42-44 (1991);
3. Moulton P. F. Spectroscopic and laser characteristics of Ti: Al_2O_3 . JOSA B. 1986; 3(1):447-462
4. Wall K.F. and Sanchez A. Titanium sapphire lasers. Lincoln Laboratory Journal. 1990; 3(3): 447-462
5. Nakamura S. et al. Blue InGaN-based laser diodes with an emission wavelength of 450 nm. Appl. Phys. Lett. 2000; 76: 22-24
6. Никитин С. П., Суворина А. С., Бабаев С. А., Куликов П. А., Корибут А. В. Мощный фемтосекундный лазер на сапфире с титаном с прямой диодной накачкой; Фотоника Том13 #6/2019
7. Kopylov D. A. , Esaulkov M. N. , Kuritsyn I. I. , Mavritskiy A. O. , Perminov B. E. , Konyashchenko A. V. , Murzina T. V. , Maydykovskiy A. I. Kerr-lens mode-locked Ti:Sapphire laser pumped by a single laser diode AI2018 LaserPhys.Lett. AI2018

Межрегиональная олимпиада школьников
«Будущие исследователи – будущее науки»

Финальный тур

Шифр

Pa-5

Предмет Физика

ФИО участника (полностью) Мавринский

Иван Алексеевич

Дата рождения (дд.мм.гггг) 16. 12. 2007

Город Москва Область _____

Образовательное учреждение Предуправительный

НИИУ МИФИ, лицей 1511

Класс 11

Межрегиональная олимпиада школьников
«Будущие исследователи – будущее науки»

Финальный тур

ФИЗИКА

Шифр

Pa-5

Задача №1	Задача №2	Задача №3	Задача №4	Задача №5	Итоговый балл	Подписи членов комиссии
20	5	5	25	-	55	

2 ч.
~~Решение~~
 $\Gamma = \text{const}$
 $m_0 = 5 \text{ г}$
 $\Gamma = 373 \text{ К}$
 $\rho = 3 \text{ г/см}^3$
 $P \uparrow = 2 \text{ атм}$
 $V_0 = ?$

до старта: $\rho_0 V_0 = \nu_0 R T = \frac{m_0}{M_0} R T$ (1)

после старта:

$$P_2 V_2 = \nu_2 R T = \frac{m_2}{M_0} R T \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{2 P_0 V_0}{3} = \frac{m_2}{M_0} R T$$
 (2)

поделим уравнения (1) и (2):

$$\frac{P_0 V_0}{\frac{2}{3} P_0 V_0} = \frac{\frac{m_0}{M_0} R T}{\frac{m_2}{M_0} R T} \Rightarrow \frac{3}{2} = \frac{m_0}{m_2}$$

$$\Rightarrow \frac{3}{2} = \frac{m_0}{m_2} \Rightarrow m_2 = \frac{m_0}{2}$$

Вода при нагревании до $P_{\text{н.к.}}$ воды пара конденсировалась \Rightarrow давление не конденсированного пара равно $P_{\text{нагр. пар}}$ при 100°C или 373 К . $\Rightarrow P_2 = 10^5 \text{ Па}$ (реш. змат.)

Межрегиональная олимпиада школьников
«Будущие исследователи – будущее науки»

Финальный тур

2 ч (продолжительное)

Реша:

$$2P_2 = 2P_0 = P_{\text{max. пар}} \Rightarrow P_0 = \frac{P_{\text{max. пар}}}{2}$$

Реша по формуле P_0 в (1):

$$P_0 V_0 = \frac{m_0}{\mu_0} RT.$$

$$\frac{P_{\text{max. пар.}}}{2} V_0 = \frac{m_0}{\mu_0} \cdot RT \Rightarrow V_0 = \frac{m_0}{\mu_0} \cdot R \cdot T \cdot \frac{2}{P_{\text{max. пар.}}}$$

$$V_0 = \frac{9}{1818} \cdot 8,31 \cdot 373 \cdot \frac{2}{105} = \underline{\underline{903 \text{ м}^3}}$$

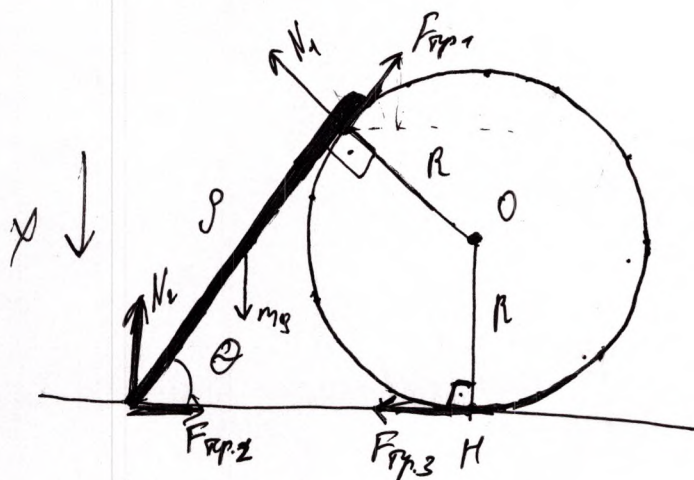
Ответ: 903 м³.

(25)

Межрегиональная олимпиада школьников
«Будущие исследователи – будущее науки»

Финальный тур

2 3



Дано:
 $\theta; R; \rho$

Найти:
 $F_{fp}(\text{наcl}; \text{зем}) - ?$
(F_{fp3})

~~Решение: нарисовать на рисунке силы~~
 $F_{fp1} = F_{fp2} = F_{fp3}$

закон Ньютона для центра масс:

$$0 = m\vec{g} + \vec{F}_{fp1} + \vec{F}_{fp2} + \vec{N}_1 + \vec{N}_2 \quad (\text{в равновесии})$$

выберем ось OX:

$$m\vec{g} = N_2 + F_{fp1} \cdot \sin \theta + N_1 \cdot \sin \theta$$

т.к. колесо не скользит \Rightarrow

$$|F_{fp3}| = |F_{fp1}| \quad (\text{в равновесии})$$

Межрегиональная олимпиада школьников
«Будущие исследователи – будущее науки»

Финальный тур

22

Дано:

$$m_1 = 6 \text{ г} \quad \left| \begin{array}{l} \epsilon = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^9 \\ \Rightarrow k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \end{array} \right.$$

$$m_2 = 4 \text{ г}$$

$$q_1 = 10^{-6} \text{ Кл}$$

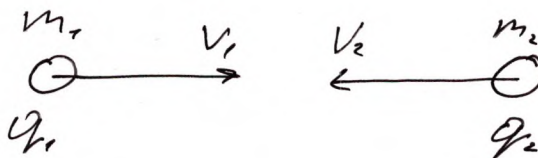
$$q_2 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$v_1 = 1 \text{ м/с}$$

$$v_2 = 2 \text{ м/с}$$

$$L = 2 \text{ м}$$

$$L_{\min} = ?$$



из ЗСЭ:

расстояние будет минимально
когда вся к. энергия перейдет
в энергию взаимодействия.

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} + \frac{k q_1 q_2}{L} = \frac{k q_1 q_2}{L_{\min}} \Rightarrow$$

$$L_{\min} = \frac{k q_1 q_2}{\left(\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} + \frac{k q_1 q_2}{L} \right)}$$

$$= \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-12} \cdot 5}{\left(\frac{0,006 \cdot 1^2}{2} + \frac{0,004 \cdot 4}{2} + \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-12} \cdot 5}{2} \right)}$$

$$\geq 1,34 \text{ м} = L_{\min}$$

Ответ: 1,34 м.

Межрегиональная олимпиада школьников
«Будущие исследователи – будущее науки»

Финальный тур

21

$$V_p = 2200 \text{ км/ч} = 2611,1 \text{ м/с}$$

$$V_n = 300 \text{ км/ч} = 83,3 \text{ м/с}$$

$$B = 48 \cdot 10^{-6} \text{ Тл}$$

$$l_p = 35,6 \text{ м}$$

$$l_n = 55,7 \text{ м}$$

$$U_p = ?$$

$$U_n = ?$$

$$U_p = l_p \cdot V_p \cdot B$$

$$U_n = l_n \cdot V_n \cdot B$$

Решаю:

$$U_p = 35,6 \cdot 48 \cdot 10^{-6} \cdot 2611,1 = 1,04 \text{ В}$$

$$U_n = 55,7 \cdot 48 \cdot 10^{-6} \cdot 83,3 = 0,22 \text{ В}$$

ср. не уверен
в ответе
поэтому
с ее же

Ответ: $U_p = 1,04 \text{ В}$ +

$U_n = 0,22 \text{ В}$ —

15

**Межрегиональная олимпиада школьников
«Будущие исследователи – будущее науки»**

Финальный тур