

УДК 621.039.546

## Мощный короткоимпульсный твёрдотельный микролазер с сегментированной диодной накачкой

© 2020 г. **Д. Н. Мамонов\***, **\*\***; **С. М. Климентов\***, канд. физ.-мат. наук;  
**С. И. Державин\***, **\*\***, канд. физ.-мат. наук; **В. Н. Тимошкин\*\***;  
**Я. В. Кравченко\*\***, канд. физ.-мат. наук; **Н. В. Карпов\***

\*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

\*\*Институт общей физики имени А.М. Прохорова РАН, Москва

E-mail: mamonau.dzmitry@gmail.com

Поступила в редакцию 11.03.2020

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-08-12-20

Экспериментально исследованы особенности импульсной генерации в компактной лазерной системе с пассивной модуляцией добротности на базе YAG: Nd<sup>3+</sup>, в которой используется сегментированная накачка активной среды семью квазинепрерывными лазерными диодами с оптоволоконными выводами излучения. Изучена зависимость возникновения генерации излучения от индивидуальных и корреляционных характеристик каналов накачки, а также в условиях отключения одного или нескольких каналов. Достигнута максимальная выходная энергия излучения в 20 мДж при длительности синхронного импульса 3,3 нс. Экспериментально подтверждена возможность получения устойчивого оптического пробоя воздуха с помощью разработанного лазера, что позволяет использовать его на практике, к примеру, для воспламенения горючих смесей.

**Ключевые слова:** твёрдотельный лазер, продольная диодная накачка, сегментированная накачка, модуляция добротности, оптический пробой воздуха.

**Коды OCIS:** 140.3580, 140.5560, 140.3540, 140.3440.

Исследования, результаты которых представлены в данной статье, были выполнены в продолжение работ [1, 2] по разработке компактного твёрдотельного лазера с продольной диодной накачкой, излучающего короткие наносекундные импульсы с энергией, значительно превосходящей известные аналоги [3, 4], которая достигается только в лазерах с поперечной накачкой [5]. Подобные лазеры требуются во многих приложениях, среди которых следует отметить лазерно-плазменное воспламенение топливных смесей в двигателях различных классов [5, 6].

Использование продольной диодной накачки активной среды позволяет существенно

уменьшить габариты лазера, а малая длина резонатора обеспечивает возможность генерации коротких мощных импульсов. Однако при продольной накачке эффективная длина активной среды ограничена значением глубины поглощения, поэтому увеличение запасённой в ней энергии может быть достигнуто преимущественно за счёт увеличения поперечных размеров накачиваемой области. Одним из способов осуществления этого является формирование нескольких каналов генерации в пределах одного активного элемента за счёт секционирования накачки — создания нескольких пространственно разделённых областей инверсной населённости в одном активном элементе.

Соответственно, возникает задача связывания (синхронизации) генерации этих областей, которая и была основной в данной работе.

Подобная задача ставилась, например, в работе [7], где рассматривались два пространственно-разнесённых канала, возбуждаемых аргоновым лазером. Исследовалась глубина интерференционной картины излучения двух каналов в зависимости от расстояния между ними. Было экспериментально подтверждено, что при достаточно большом пространственном разнесении областей генерации, взаимодействие ослабевает. В [8] исследовалась интерференционная картина при возникновении непрерывной генерации каналов в зависимости от перекрытия и разницы инверсии в областях накачки. В работе [9] для аналогичной схемы была построена теоретическая модель.

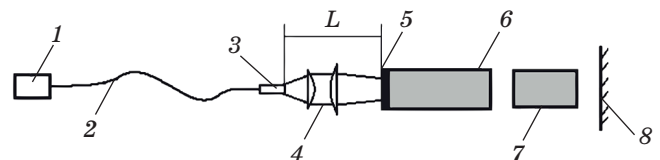
Для целей данной работы большую важность представляют вопросы, связанные с процессом установления связанной генерации, особенно в короткоимпульсном режиме, которые в настоящее время изучены недостаточно. В работе [10] исследовалась динамика формирования импульсов свободной генерации в трёхканальной системе при накачке Ti-Sa лазером. Ранее авторами были подробно рассмотрены процессы связывания коротких импульсов излучения в двух близкорасположенных каналах генерации в пределах одного твёрдотельного активного элемента [1]. Для их описания авторами была предложена расчётно-теоретическая модель, дающая хорошее согласие с экспериментальными данными. На основании их анализа и теоретического моделирования был сделан вывод, что наиболее вероятной причиной возникновения синхронизации каналов при генерации коротких импульсов излучения является установление оптической связи посредством обмена фотонами, испускаемыми под небольшим углом к оси резонатора, которые спонтанно возникают в сегментах накачки.

В работе авторов [2] описана система из семи каналов генерации в твёрдотельном активном элементе на основе иттрий-алюминиевого граната с пассивной модуляцией добротности и кратко рассмотрены характеристики полученной системы. Данное устройство создавалось в рамках проекта по разработке системы воспламенения горючих смесей и при определении требуемых выходных параметров за прототип рассматривалась система, описанная в работе [11].

В настоящей работе даётся описание механизма взаимодействия каналов генерации, а также детальное описание условий и закономерностей возникновения синхронных коротких лазерных импульсов в режиме модулированной добротности в семи каналах накачки в пределах одного твёрдотельного активного элемента, которые образуют плотную пространственную конфигурацию. В отличие от статьи [2], в которой кратко даётся информация о наблюдении эффекта связывания семи каналов генерации, на момент написания настоящей работы уже были проведены исследования, описанные в работе [1]. Так, в работе [2] предполагалось, что наблюдается единый импульс генерации от всех семи каналов, что не подтвердилось при более детальном рассмотрении. А в работе [1] была отвергнута идея о формировании когерентной супермоды от всех каналов генерации, что привело к модели синхронизации каналов с временной задержкой между импульсами и созданию расчётно-теоретической модели для описания эффекта связывания каналов.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КАНАЛОВ ГЕНЕРАЦИИ

Оптимизация проводилась в два этапа. На первом оптимизировались условия накачки и конфигурация лазерного резонатора для генерации отдельного канала, схема которого изображена на рис. 1. Накачка активного элемента 6, который представлял собой цилиндр длиной 15 мм и диаметром 8 мм, осуществлялась импульсным диодным модулем 1 с оптоволоконным выводом излучения, имеющим максимальную выходную мощность 100 Вт и частотой 30 Гц. Накачиваемая область формировалась в активном элементе с помощью двух-



**Рис. 1.** Схема отдельного канала генерации. 1 — диодный QCW модуль, 2 — многомодовое оптическое волокно, 3 — выходной торец волокна, 4 — объектив, 5 — дихроичное зеркало, 6 — кристалл YAG: Nd<sup>3+</sup>, 7 — пассивный затвор YAG: Cr<sup>4+</sup>, 8 — выходное зеркало.

линзового объектива 4. Кристалл пассивного затвора имел толщину 3 мм и диаметр 9 мм, длина лазерного резонатора составляла 26 мм.

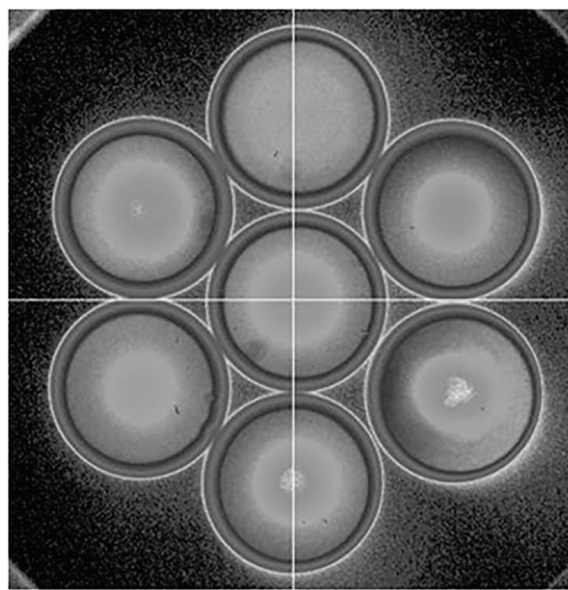
Задачей при оптимизации схемы отдельного канала стояло получение энергии в импульсе не менее 2,0 мДж при длительности не более 5 нс и качестве пучка  $M^2$  не более 3,5. Для получения требуемых параметров варьировались увеличение объектива 4 и его положение относительно активного элемента 6, значения коэффициента отражения  $R$  внешнего зеркала 8 и начального пропускания  $T_0$  пассивного затвора 7. Генерация одиночных импульсов осуществлялась путём ограничения длительности накачки, её максимальное значение не превышало 450 мкс. Положения и фокусы линз были выбраны следующими:  $d = 12,5$  мм для  $f = 20$  мм и  $d = 24,5$  мм для  $f = 30$  мм, расстояния указаны от торца волокна. В табл. 1 приведены полученные значения энергий генерации.

Наибольшие значения энергии импульса были получены при начальном пропускании пассивного затвора  $T_0 = 30\%$ , однако в этом случае возникали заметные повреждения в объёме кристалла пассивного затвора из насыщающегося поглотителя Cr:YAG. Диапазон значений энергии в ячейке табл. 1 для  $T_0 = 30\%$  и  $R = 50\%$  фактически соответствует различной степени оптических повреждений пассивного затвора. Для обеспечения режима работы, гарантирующего отсутствие разрушений оптических элементов, необходимо, чтобы начальное пропускание насыщающегося поглотителя и коэффициент отражения выходного зеркала составляли  $T_0 = 40\%$ ,  $R = 50\%$ , соответственно. Для этих значений длительность импульса излучения канала по полувысоте составляла 3 нс, а  $M^2$  был менее 2,2. Соответственно, ожидаемое значение энергии для системы из семи каналов должно составлять около 20 мДж. Возможность юстировки объектива позволяла

варьировать распределение инверсии, что было использовано позднее в экспериментах по оптимизации перекрытия распределений накачки в сегментах с целью достижения связанной импульсной генерации.

Последующие эксперименты проводились в конфигурации с семиканальной системой торцевой накачки, которая отличалась от изображённой на рис. 1 одноканальной системы использованием семи диодных модулей 1 с оптоволоконными выводами, объединёнными в жгут. Один из выводов является центральным и совпадает с осью жгута, остальные шесть расположены вокруг него, образуя плотную упаковку волокон (рис. 2). Диаметр сердцевин каждого волокна равен 400 мкм, эффективный диаметр выходного торца жгута — 1,32 мм. Формирование плотной пространственной конфигурации сегментов накачки в объёме активного элемента достигалось отображением торца жгута с помощью двухлинзового объектива 4, как показано на рис. 1.

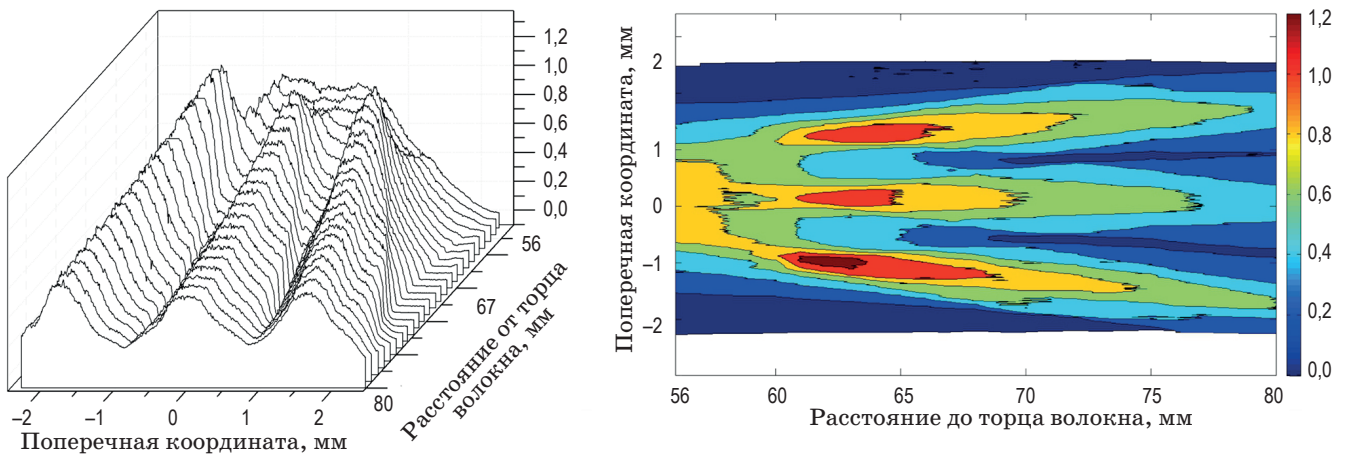
Выходная мощность и распределение излучения на выходе разных волокон несколько отличались друг от друга. На рис. 2 представлено распределение интенсивности системы накачки, измеренное в фокальной плоскости объектива 4. Глубина резкости оптической системы фокусировки излучения накачки была меньше длины активного элемента и приблизительно составляла 5 мм.



**Рис. 2.** Распределение интенсивности накачки активной среды в плоскости фокуса объектива.

**Таблица 1.** Энергия лазерных импульсов в одноканальном канале

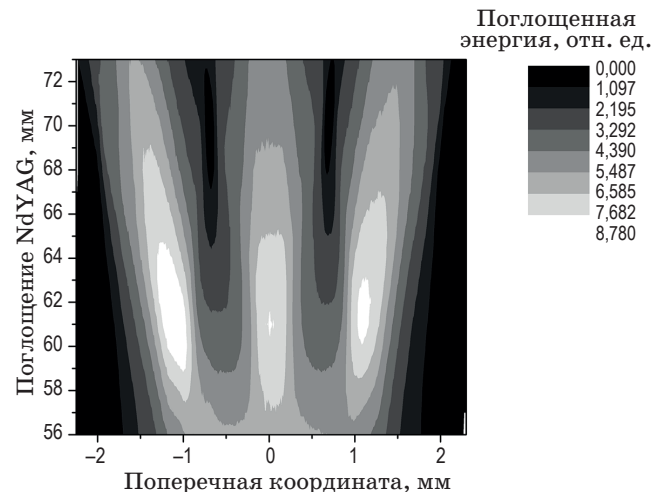
$R/T_0$	$T_0 = 30\%$	$T_0 = 40\%$	$T_0 = 65\%$
$R = 75\%$	–	2,53 мДж	1,1 мДж
$R = 50\%$	2,85–3,15 мДж	2,94 мДж	1,0 мДж
$R = 15\%$	Нет генерации	Нет генерации	0,2 мДж



**Рис. 3.** Распределение интенсивности накачки в продольном сечении, проходящем через три сегмента накачки в активном элементе.

Чтобы получить полную 3D картину распределения интенсивности накачки в объёме активной среды, были измерены распределения интенсивности накачки в сечении активной среды при различных значениях расстояния от торца активной среды до выходного торца жгута  $L$  (рис. 3). Распределение интенсивности накачки в продольном осевом сечении активной среды, проходящем через три сегмента накачки (соответствует вертикальной линии на рис. 2), представлено на рис. 3 на диаграмме справа. Плоскость резкого изображения, соответствующая изображению поперечного сечения на рис. 2, располагалась на расстоянии  $L = 71$  мм. Распределение для расстояний, сильно превышающих это значение, не представляет практического интереса в связи с рассеиванием заметной доли излучения накачки и выходом его за пределы области, в которой происходит генерация (уменьшается согласование размеров области генерации и накачки).

На рис. 4 приведена диаграмма распределения поглощённого излучения накачки в объёме активного элемента в зависимости от расстояния  $L$ . Данные для её построения были получены путём суммирования распределений по сечениям, отстоящим друг от друга по оси кристалла на 1 мм. При этом вводились поправочные коэффициенты (веса), учитывающие поглощение в кристалле YAG: Nd. Как видно из диаграммы, постепенная отстройка от плоскости фокусировки к значениям  $L = 60$ –70 мм уменьшает расстояние между



**Рис. 4.** Суммарное распределение поглощённой энергии излучения накачки в продольном сечении активного элемента. По вертикальной оси указаны значения расстояния  $L$  от выходного торца оптоволоконного жгута до входного торца активного элемента с дихроичным покрытием.

областями накачки и увеличивает долю энергии излучения накачки, поглощённой в областях между сегментами, т.е. перекрытие каналов накачки возрастает.

Отметим, что оптимальное значение  $L$  для одиночного излучающего сегмента равно 68 мм. Можно рассчитывать, что при таком значении  $L$  полная поглощённая энергия всей совокупности сегментов накачки окажется приблизительно равной сумме энергий каждого из сегментов.



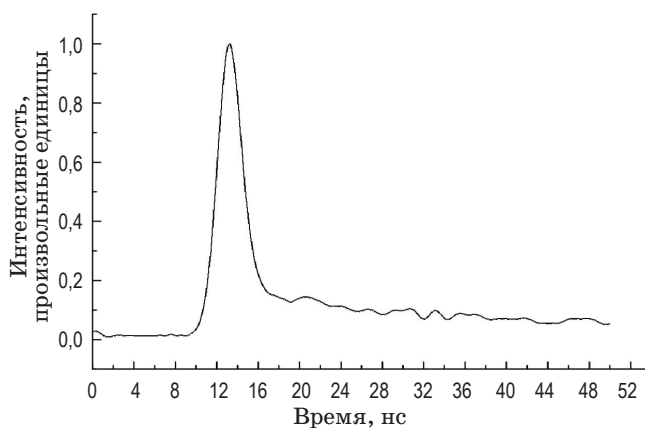
## РАЗДЕЛЬНАЯ И СВЯЗАННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ КАНАЛОВ

Режим генерации системы с сегментированной накачкой критическим образом зависел от положения активного элемента 6, небольшие перемещения которого вдоль оси системы приводили к переходу от раздельной к связанной генерации, и наоборот. А именно, при значениях  $L > 68$  мм на осциллограмме регистрировались семь несинхронных импульсов генерации, излучаемых во временном интервале длительностью до сотни микросекунд. В интервале изменения значений  $L$  от 68 до 66 мм, соответствующем переходной области, наблюдалась синхронизация только части излучаемых импульсов. При уменьшении расстояния  $L$  до 66 мм в системе устанавливался режим синхронной генерации, в котором излучался одиночный импульс с длительностью по полувысоте менее 4 нс (рис. 5).

Для выявления факторов, приводящих к изменению характера генерации системы, были измерены и рассчитаны суммарные пространственные распределения поглощённой энергии накачки. На рис. 6 приведены два таких распределения в поперечном сечении активной среды для граничных значений переходной области, равных 68 и 66 мм.

Чтобы оценить изменение в распределении интенсивности накачки для этих пограничных значений  $L$ , было рассчитано распределение, соответствующее разности распределений энергии накачки на рис. 6. Результат вычисления представлен на рис. 7.

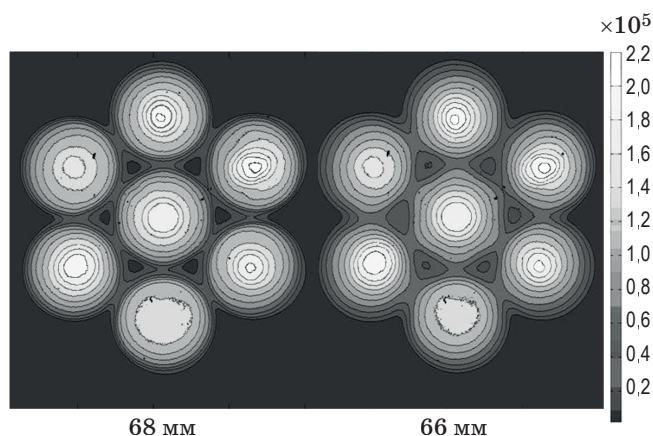
Значения на рис. 7 нормированы на максимальное значение поглощённой энергии



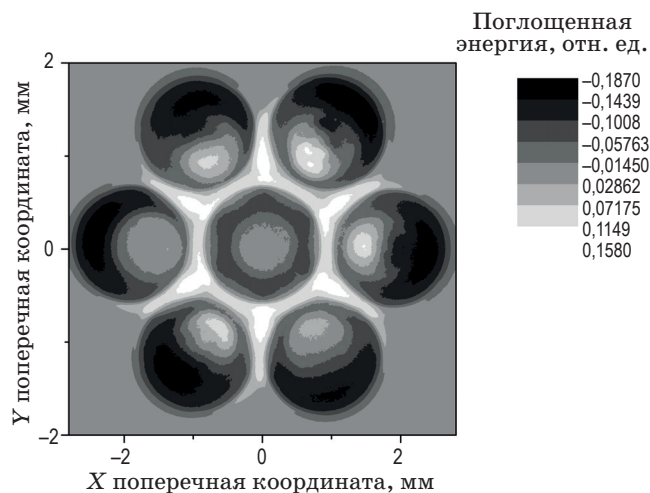
**Рис. 5.** Временная форма импульса синхронной генерации в семи каналах.

в центральном канале. Поэтому области темнее фона соответствуют оттоку энергии, а светлее фона, соответственно, её поступлению. На рис. 7 видно, что заметная доля энергии каналов накачки перераспределена в промежутках между ними, а максимумы распределения периферийных каналов смещены в сторону центрального. Прирост энергии в область между каналами составил около 10% от уровня накачки в центральном канале. При этом, как видно из рис. 4, на 7% уменьшилось расстояние между центрами каналов накачки.

В работе авторов [1] были установлены условия возникновения связанной генерации при сближении двух сегментов накачки при за-



**Рис. 6.** Поперечное распределение суммарно поглощённой энергии накачки в активном элементе для значений  $L$  68 и 66 мм, соответствующих раздельной и синхронной генерации лазерных импульсов.



**Рис. 7.** Разность распределений поглощённой энергии накачки для раздельной ( $L = 68$  мм) и синхронной генерации ( $L = 66$  мм).

данном профиле накачки. В случае двух каналов накачки можно было выделить ведущий и ведомый канал. При этом импульс в ведомом канале возникал с задержкой, зависящей не только от расстояния между сегментами накачки, но и от начального пропускания модулятора, а также от конкретной моды, определяемой длиной резонатора. Следует ожидать, что при наблюдаемой синхронизации в семиканальной компактной конфигурации для различных пар каналов будут проявляться те же закономерности. Согласно проведённым оценкам, в рассматриваемой семиканальной конфигурации задержка генерации между каналами должна составлять около 3 нс. Длительность импульса, излучаемого отдельным сегментом, также составляет 3 нс, а длительность импульса синхронной генерации семи каналов лишь незначительно превышает это значение и составляет менее 4 нс. При этом длительность импульса синхронной генерации сокращается с дальнейшим уменьшением расстояния  $L$ . Более детально этот эффект описан в работе [1].

Следовательно, при наличии большого числа близко расположенных сегментов накачки возникают дополнительные факторы, связанные со взаимным влиянием каналов и вызванные снижением потерь на рассеяние накачки и эффектами дальнего действия, которые способствуют уменьшению задержки синхронной генерации. В этом случае, роль ведущего канала играет центральный, а все остальные — ведомые, поскольку в силу своего выделенного положения центральный канал в наибольшей степени подпитывается соседними вследствие перекрытия распределений накачки, что снижает порог генерации в нём. Стартуя первым, центральный канал наиболее эффективно и с минимальной задержкой включает соседние каналы, снижая время просветления затвора и ускоряя в них процесс развития генерации. Таким образом, синхронной генерации в плотной конфигурации соответствует, по-видимому, минимальная длительность суммарного импульса излучения.

## ЭНЕРГИЯ ИМПУЛЬСА И ОПТИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ ВОЗДУХА

Поскольку лазерно-плазменный поджиг топливных смесей производится посредством оптического пробоя в смеси [5, 6], была про-

ведена экспериментальная проверка способности разработанной системы осуществлять лазерный пробой в воздухе атмосферного давления. При прочих равных условиях вероятность появления пробоя увеличивается с ростом интенсивности лазерного излучения. Поэтому был проведён поиск возможностей повышения интенсивности излучения лазера. Эти исследования выполнялись в два этапа. На первом этапе оптимизировалось максимальное значение выходной энергии в импульсе синхронной генерации семи каналов, а на втором этапе производилась оптимизация системы по результатам наблюдений оптического пробоя в воздухе в фокусе линзы.

На первом этапе использовались выходное зеркало с коэффициентом отражения  $R = 75\%$  и затвор с начальным пропусканием  $T_0 = 40\%$ . Диапазон расстояний  $L$  от торца волокна составлял 66,5–62,5 мм. Верхнее значение выбиралось для получения режима синхронной генерации для всех каналов накачки. В табл. 2 приведены средние значения энергий для различных положений кристалла активного элемента. Длительность импульса составляла 4 нс для  $L = 66,5$  мм и 3,3 нс для  $L = 63,5$  мм.

Наблюдаемое возрастание энергии в импульсе и последующий её спад, предположительно, связаны с перестройкой мод в сегментах или с неоднородностями активного элемента. По-видимому, в данном интервале происходит переход от генерации преимущественно в отдельных каналах к генерации мод более высокого порядка, охватывающих несколько каналов накачки. При такой комбинации параметров насыщающегося поглотителя и выходного зеркала ( $T_0 = 40\%$ ,  $R = 75\%$ ) наблюдалось максимально достигнутое значение энергии в импульсе при сохранении режима связанной генерации семи каналов. Однако наблюдавшийся оптический пробой воздуха с использованием линзы с фокусным расстоянием 20 мм был нестабильным.

**Таблица 2. Энергия генерации от положения кристалла первый этап**

Положение активного элемента $L$ , мм	66,5	65,5	64,5	63,5	62,5
Энергия, мДж	13,0	15,7	17,9	19,6	17,1

На втором этапе для сокращения длительности импульса генерации использовалось выходное зеркало с меньшим коэффициентом отражения  $R = 50\%$  и насыщающийся поглотитель с тем же начальным пропусканием  $T_0 = 40\%$ . Диапазон расстояний  $L$  от торца волокна составлял 64–57 мм. Так же, как и на предыдущем этапе использовалась линза с фокусным расстоянием 20 мм. Зависимость значений энергии от положения активного элемента  $L$  приведена в табл. 3.

Наблюдавшееся уменьшение энергии генерации, предположительно, связано с изменением размера накачиваемой области. Оптический пробой наблюдался в диапазоне значений  $L = 61$ –59 мм. Продольное смещение активного элемента относительно оси резонатора позволило за счёт сближения каналов генерации улучшить качество выходного пучка всей системы ( $M^2$  оценивается как не более 5,6). Так, размер перетяжки в фокусе линзы уменьшался, что способствовало получению оптического пробоя.

Подобный способ варьирования параметров системы позволил без особых сложностей отрегулировать распределение поглощённого излучения накачки в объёме активного элемента. Улучшение качества пучка генерации, сопровождающее изменение распределения поглощения, позволяет добиться значительного улучшения профиля выходного пучка, а значит, плотности энергии в его перетяжке. Это, в свою очередь, даёт возможность получить оптический пробой с помощью линз, имеющих большее фокусное расстояние. Так как улучшение качества пучка при уменьшении расстояния  $L$  сопровождалось падением энергии в импульсе генерации, была проведена оптимизация этого параметра по вероятности возникновения пробоя. Это оптимальное значение  $L$  определялось эмпирически и приблизительно равнялось 60 мм. При этом импульс генерации имел длительность порядка 3 нс по полувысоте. Форма импульса показана на рис. 5.

Также в экспериментах, описанных в данном разделе, было замечено, что на энергию импульсов системы заметное влияние оказывало относительное вращение вдоль оси кристаллов активного элемента Nd: YAG и насыщающегося поглотителя Cr: YAG. Диапазон изменений выходной энергии составил от 10,6 мДж при времени задержки генерации в 300 мкс до 16,7 мДж при задержке в 395 мкс, что соответствовало вращению кристаллов в пределах  $\pm 15^\circ$ . Этот эффект можно объяснить двулучепреломлением материала пассивного затвора в сочетании с оптической неоднородностью кристаллов активного элемента и пассивного затвора. Увеличение времени задержки соответствует снижению эффективного начального пропускания пассивного затвора, что приводит к накоплению большей инверсии на момент возникновения генерации. В итоге для достижения больших значений энергии в импульсе было использовано зеркало с большим пропусканием ( $R = 50\%$ ) и согласован относительный поворот кристаллов насыщающегося поглотителя и активного элемента. Так, в конечном варианте системы энергия в импульсе составила 15,6 мДж, а длительность 3 нс при параметре  $M^2 < 5,6$ .

### ГЕНЕРАЦИЯ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ КАНАЛОВ НАКАЧКИ

Для оценки надёжности многоканальной лазерной системы важно знать её поведение и характеристики при отключении накачки в одном или нескольких каналах. Эти исследования проводились в конфигурации оптимального качества и энергии пучка, описанной в предыдущем разделе. Данные по отключению каналов представлены в табл. 4.

Во всех указанных в табл. 4 вариантах генерация представляла собой единый синхронизированный импульс длительностью 3 нс. Можно заметить, что по мере отключения каналов накачки энергия суммарного импульса


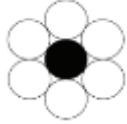
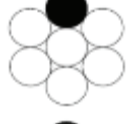
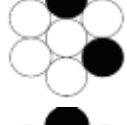
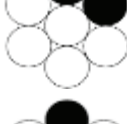
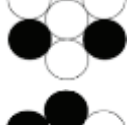
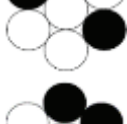
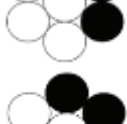


Таблица 3. Энергия генерации от положения кристалла второй этап

Положение активного элемента $L$ , мм	64	63	62	61	60	59	58	57
Энергия, мДж	17,5	15,8	14,5	14,7	13,8	13,9	12,8	13,1

оставалась примерно пропорциональной числу включённых каналов. Отключение каналов также сопровождалось ростом задержки возникновения генерации от переднего фронта импульса тока накачки, что свидетельствует

об увеличении пороговых значений инверсии. Следует отметить особую роль центрального канала, при отключении которого генерация не возникала, что подтверждает его роль, как ведущего канала.

**Таблица 4. Режимы генерации при отключении накачки одного или нескольких сегментов в активном элементе**

Работающие каналы *	Задержка лазерной генерации относительно начала импульса тока накачки	Энергия выходного излучения \ наличие пробоя
	260 мкс	15,6 мДж \ есть пробой
	Нет генерации	Нет генерации \ нет пробоя
	284 мкс	13,2 мДж \ есть пробой
	296 мкс	11,3 мДж \ есть пробой
	296 мкс	11,25 мДж \ есть пробой
	Нет генерации	Нет генерации \ нет пробоя
	420 мкс	8,5 мДж \ нет пробоя
	336 мкс	8,4 мДж \ нет пробоя
	398 мкс	6,1 мДж \ нет пробоя
	Нет генерации	Нет генерации \ нет пробоя

\*) Черный кружок — накачка отсутствует, белый кружок — накачка включена.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате описанных в данной статье исследований был разработан твёрдотельный импульсный микролазер с семью продольными секциями накачки активного элемента. Энергия импульсов составляла около 20 мДж при длительности 3,3 нс, частота следования импульсов 30 Гц. Его схема может быть использована как основа для разработки целого класса лазерных устройств мобильного и стационарного применения, таких как устройства воспламенения топливных смесей в двигателях и энергетических установках, устройства дистанционного зондирования, компактные источники аблирующего излучения для определения химического состава материалов, оборудование лазерной микрообработки, включая абляционный синтез наноматериалов методами напыления в среде разреженных газов и абляционный синтез наночастиц в коллоидных растворах для технологических и биомедицинских применений. Оптическая схема лазера обеспечивает воз-

можность гибкой оптимизации его характеристик, как по значениям максимальной выходной энергии, так и по качеству выходного пучка для достижения максимальной мощности при фокусировке.

Конструкция устройства допускает монолитное исполнение, объединяющее элементы резонатора в единой жёсткой микрочип-конфигурации, что обеспечит высокую надёжность устройства в условиях вибрации, температурных перепадов и других экстремальных условиях. Следует также отметить, что пространственное разнесение излучателя и модуля накачки, использованное в конструкции, существенно облегчает решение технической задачи по термостабилизации лазерных диодов.

Работа была частично поддержана в рамках Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (соглашение от 27.08.2013, проект #02.а03.21.0005) и в рамках исследовательской программы “Совершенствование лазерных систем” (No. 0024-2019-0001).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Mamonov D.N., Klimentov S.M., Derzhavin S.I., Kravchenko Ya.V. Generation dynamics of coupled pulses from a single active element of the end-pumped solid-state laser: experiment and simulation // *Physics of Wave Phenomena*. 2018. Т. 26. № 3. С. 214–220.
2. Mamonov D.N., Il'ichev N.N., Sirotkin A.A., Pivovarov P.A., Rebrov S.G., Derzhavin S.I., Klimentov S.M. High-power compact laser with segmented longitudinal pumping of coupled laser channels // *Quantum Electronics*. 2015. Т. 45. № 6. С. 508–510.
3. Tsunekane M., Inohara T., Ando A., Kido N., Kanehara K., Taira T. High peak power, passively-switched microlaser for ignition of engines // *Quantum Electronics*. 2010. Т. 46. № 2. С. 277–284.
4. Bhandari R., Taira T. > 6 MW peak power at 532 nm from passively Q-switched Nd: YAG/Cr: YAG microchip laser // *Optics express*. 2011. V. 19. № 20. P. 19135–19141.
5. Kroupa G., Winkelhofer E., Franz G. Novel miniaturized high-energy Nd-YAG laser for spark ignition in internal combustion engines // *Optical Engineering*. 2009. V. 48. № 1. P. 014202–5.
6. Pavel N., Tsunekane M., Taira T. Composite, all-ceramics, high-peak power Nd: YAG/Cr: YAG monolithic micro-laser with multiple-beam output for engine ignition // *Optics express*. 2011. V. 19. № 10. P. 9378–9384.
7. Fabiny L., Colet P., Roy R., Lenstra D. Coherence and phase dynamics of spatially coupled solid-state lasers // *Physical Review A*. 1993. V. 47. № 5. P. 4287.
8. Laabs H., Ozygus B. The influence of transverse structures on the coupling of solid-state lasers // *Optics and Laser Technology*. 1997. V. 29. № 7. P. 401–406.
9. Zehnle V. Theoretical model for coupled solid-state lasers // *Physical Review A*. 2000. V. 62. № 3. P. 033814.
10. Möller M., Forsmann B., Jansen M. Dynamics of three coupled Nd: YVO<sub>4</sub> microchip lasers // *Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics*. 2000. V. 2. № 3. P. 371.
11. Pavel N., Tsunekane M., Taira T. Composite, all-ceramics, high-peak power Nd: YAG/Cr: YAG monolithic micro-laser with multiple-beam output for engine ignition // *Optics express*. 2011. V. 19. № 10. P. 9378.