

Эффективность поперечной накачки импульсного твердотельного лазера на Nd:YAG линейками лазерных диодов

А.Ю.Абазадзе, Г.М.Зверев, Ю.М.Колбацков

Экспериментально исследован YAG: Nd³⁺-лазер с поперечной схемой накачки цилиндрического активного элемента квазинепрерывными линейками лазерных диодов, расположенными вокруг его боковой поверхности. Разработанные модули накачки с симметричной и несимметричной геометрией позволили реализовать в режиме многомодовой свободной генерации дифференциальную эффективность порядка 48 и 55 % при накачке элементов диаметром 3 и 5 мм соответственно. В условиях, соответствующих данной эффективности использования излучения линеек лазерных диодов, в режиме модуляции добротности резонатора была получена генерация импульсов с энергией 28 и 55 мДж.

Ключевые слова: линейка лазерных диодов, твердотельный лазер с поперечной схемой накачки линейками лазерных диодов.

1. Введение

Важнейшей проблемой, возникающей при разработке твердотельных лазеров, является обеспечение максимального использования энергии накачки. В настоящее время возник новый класс источников когерентного излучения – полностью твердотельные лазеры, который включает в себя твердотельные лазеры с накачкой лазерными диодными структурами. Лазеры данного класса обладают рядом достоинств – высокой эффективностью использования излучения накачки, высоким качеством пучка излучения, длительным сроком службы, которые и определяют возможность их успешного использования в различных областях науки и техники [1].

Однако для реализации перечисленных преимуществ при создании твердотельного лазера с накачкой излучением лазерных диодов необходимо выбрать оптимальную схему модуля накачки, позволяющую максимально эффективно обеспечить необходимые энергетические характеристики лазера в сочетании с определенными пространственно-временными и спектральными характеристиками излучения. Известно, что накачка активного элемента твердотельного лазера диодными структурами может быть реализована по одной из двух известных схем – продольной или поперечной, каждая из которых обладает характерными достоинствами и недостатками [2]. В частности, продольная схема накачки позволяет реализовать генерацию пучков высокого качества при относительно высокой эффективности использования излучения лазерных диодов [3]. Однако при необходимости увеличения энергетического потенциала лазера использование продольной схемы представляется неоптимальным [4].

Наиболее перспективными с точки зрения достиже-

ния достаточно высоких энергетических характеристик лазерного излучения являются системы поперечной накачки. В качестве единичного элемента накачки в таких системах используются либо отдельные линейки лазерных диодов (ЛЛД), либо решетки, собранные из большого числа ЛЛД. Указанные элементы системы накачки располагаются вокруг цилиндрической боковой поверхности активного элемента и группируются в секции. Благодаря этому увеличение выходной энергии импульса лазерного излучения может достигаться за счет как увеличения числа секций системы накачки вдоль активного элемента, так и изменения числа элементов в одной секции [5 – 7].

При создании твердотельного лазера, обладающего набором заданных энергетических, спектрально-временных и пространственных характеристик излучения, возникает задача оптимизации конфигурации модуля накачки с целью эффективного преобразования энергии излучения накачки в лазерную генерацию. Поскольку в поперечной схеме накачки могут быть использованы активные элементы различной формы и объема, при ее разработке необходимо решить проблему эффективности использования излучения ЛЛД и определить условия, при которых достигается необходимая энергия твердотельного лазера.

В настоящей работе экспериментально исследована эффективность генерации YAG: Nd³⁺-лазера, работавшего в режимах свободной генерации и модуляции добротности резонатора, с поперечной схемой накачки цилиндрического активного элемента линейками лазерных диодов, располагавшихся вблизи боковой поверхности элемента. Целью работы было определение оптимальных параметров системы поперечной накачки цилиндрического активного элемента излучением ЛЛД, позволяющих реализовать генерацию импульсов с энергией в несколько десятков миллиджоулей при работе лазера в режиме модуляции добротности резонатора. Эксперименты, проведенные в настоящей работе, развивают исследования, описанные в работе [8].

2. Оценка эффективности и выбор конфигурации модуля накачки цилиндрического активного элемента YAG: Nd³⁺ линейками лазерных диодов

В общем случае полная эффективность схемы накачки определяется тремя основными факторами: эффективностью передачи излучения лазерных диодов активному элементу, поглощением излучения накачки в активной среде и пространственным согласованием области, в которой создается инверсная населенность, с соответствующим распределением набора поперечных мод открытого резонатора [9]. Наиболее простой способ передачи излучения ЛЛД, имеющих стандартную длину 1 см, активной среде реализуется при их расположении вдоль оси цилиндрического активного элемента в непосредственной близости от его поверхности [10].

Поглощение излучения в активном элементе лазера определяется согласованием спектров излучения ЛЛД, собранных в модуле накачки, со спектром поглощения самого активного элемента, коэффициент поглощения которого зависит от концентрации активных ионов, а также от характерных размеров области поглощения излучения накачки, зависящих, в свою очередь, от диаметра активного элемента и числа проходов по нему излучения накачки. Максимальное пространственное согласование между неоднородно распределенной по активному элементу инверсной населенностью с некоторым набором поперечных мод используемого резонатора в результате конкуренции обеспечивает выполнение условия генерации именно для этого набора мод, определяющего пространственные характеристики излучения лазера.

Представленные в [8] результаты предварительных экспериментов по поперечной накачке секциями из двух ЛЛД, расположенными под углом 45° друг к другу, активных элементов YAG: Nd³⁺ диаметром от 1.5 до 5 мм показали, что эффективный коэффициент поглощения излучения ЛЛД составляет примерно 3.5 см⁻¹ для кристаллов с атомной концентрацией ионов активатора 0.8 % и примерно 4.7 см⁻¹ – для кристаллов с атомной концентрацией 1.2 %. Это позволило сделать вывод о том, что при поперечной накачке активного элемента YAG: Nd³⁺ с диаметром не более 3 мм и концентрацией ионов неодима 0.8–1.2 % необходимо реализовать не менее двух проходов излучения ЛЛД по сечению элемента для его эффективного поглощения активной средой. В активных элементах диаметром 4 мм с концентрацией активатора 1.2 % и диаметром 5 мм с концентрацией 0.8 % для эффективного поглощения и создания необходимой инверсной населенности достаточно одного прохода излучения ЛЛД по активной среде.

Для экспериментального исследования было выбрано и реализовано два различных модуля накачки с симметричным и несимметричным расположением ЛЛД под углом 45° друг к другу вокруг цилиндрического активного элемента (рис.1). В первой схеме (рис.1,а) восемь ЛЛД были расположены в секциях симметрично вокруг кристалла YAG: Nd³⁺ на расстоянии примерно в 0.5 мм от него. Во второй схеме (рис.1,б) цилиндрический элемент устанавливался в медном радиаторе таким образом, чтобы примерно половина его боковой поверхности была охвачена зеркально отражающей излучение накачки серебряной фольгой, а ЛЛД по четыре в секции рас-

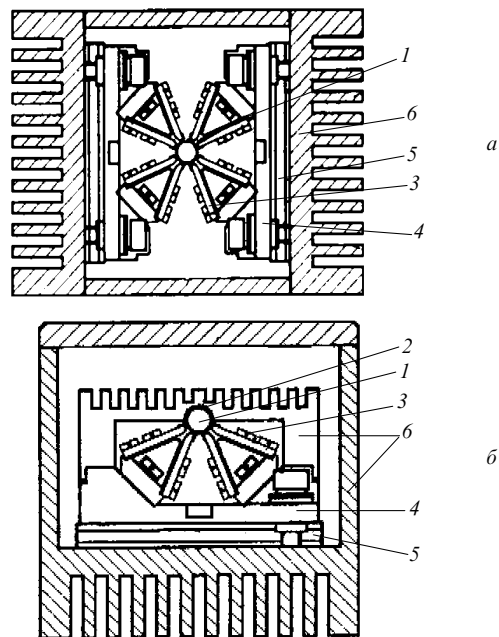


Рис.1. Схемы исследуемых модулей поперечной накачки цилиндрического активного элемента линейками лазерных диодов с симметричным расположением восьми линеек в секции вокруг активного элемента без отражателя (а) и с несимметричным расположением четырех линеек в секции и отражателем на противоположной стороне активного элемента (б):

1 – активный элемент; 2 – отражатель; 3 – ЛЛД; 4 – основание для крепления ЛЛД; 5 – термоэлектрический элемент; 6 – радиатор.

полагались вокруг противоположной стороны элемента. Следовательно, в модуле с несимметричным расположением ЛЛД простейшим образом была реализована двухпроходная схема использования излучения накачки, а в модуле с восемью ЛЛД – однопроходная.

Для экспериментального исследования описанных выше модулей накачки были использованы квазинепрерывные ЛЛД, разработанные и изготовленные в НИИ «Полнос». Длина ЛЛД вдоль «медленной» оси составляла 10 мм при расходимости пучка вдоль этой оси 10° (по половинной интенсивности). Расходимость пучка вдоль «быстрой» оси составляла 45°. ЛЛД были смонтированы на медных пластинах, геометрия которых позволяла, во-первых, эффективно отводить тепловые потоки от активных элементов лазерных диодов и, во-вторых, компактно располагать ЛЛД вокруг цилиндрических активных элементов из YAG: Nd³⁺ диаметрами 3–5 мм.

Для проведения экспериментов отбирались ЛЛД, имевшие необходимые энергетические и спектральные параметры излучения – импульсную мощность не менее 60 Вт (при измерении в угле 60°) в спектральном диапазоне 806.3–810.5 нм. При указанных выше пространственных параметрах пучка излучения ЛЛД в симметричном модуле и диаметре активного элемента 5 мм доля излучения накачки, попадавшего в активную среду, определялась только френелевскими потерями на поверхности кристалла и составляла примерно 90 %. В несимметричном модуле (при использовании четырех ЛЛД, располагавшихся наиболее компактным образом, см. рис.1,б), часть пространственной диаграммы излучения накачки не была согласована с поверхностью элемента, поэтому доля попадавшего в активную среду излучения ЛЛД составляла не более 75 %.

3. Результаты экспериментов

Для исследования эффективности накачки цилиндрических активных элементов YAG:Nd³⁺ лазерными линейками в ходе экспериментов проводилось измерение энергии импульса излучения лазера, работавшего в режимах свободной генерации и модуляции добротности резонатора, с представленными на рис.1 симметричным и несимметричным модулями накачки. При этом в симметричном модуле были использованы две последовательно расположенные секции из восьми ЛЛД в каждой (рис.1,а). Модуль с несимметричной накачкой состоял из трех секций по четыре ЛЛД в каждой (рис.1,б).

Поскольку целью экспериментов было исследование именно энергетической эффективности поперечной накачки кристаллов YAG:Nd³⁺ различной геометрии без учета влияния термооптических эффектов, частота повторения импульсов ЛЛД длительностью 200 мкс составляла 5 Гц. По той же причине в экспериментах использовался резонатор, геометрия которого обеспечивала генерацию именно многомодового пучка, пространственное распределение излучения в котором соответствовало распределению плотности инверсной населенности, реализованной в активном элементе соответствующим модулем накачки. Для поддержания длины волны излучения ЛЛД в заданном спектральном диапазоне температура медного основания, на котором монтировались линейки (см. рис.1), регулировалась и поддерживалась термоэлектрическими микрохолодильниками.

Измерения энергии импульса излучения лазера, работавшего в режимах свободной генерации и модуляции добротности резонатора, проводились при разных коэффициентах отражения R₁ выходного зеркала резонатора. Радиус кривизны полностью отражающего зеркала составлял 100 см, длина резонатора – 22 см. При диаметре активного элемента более 3 мм и выбранной геометрии резонатора его число Френеля было значительно больше единицы, что и обеспечивало существенно многомодовый характер генерации. В серии экспериментов, выполненных в описанных выше условиях, были получены результаты, представленные на рис.2, 3 и 5 для симметричного модуля накачки, и на рис.4 и 6 – для несимметричного. Полученные основные энергетические характеристики исследованного лазера – дифференциальная эффективность η и «спрямленный» порог генерации E_{th} – приведены на поле соответствующих рисунков.

Из анализа представленных результатов следует, что при использовании кристаллов YAG:Nd³⁺ диаметром 5 мм в симметричной схеме накачки без отражателя и диаметром 3 мм в несимметричной схеме с отражателем в режиме свободной генерации была реализована фактически не зависящая от концентрации активных ионов максимальная дифференциальная эффективность не менее 55 и 48 % соответственно. Для кристалла диаметром 4 мм в симметричном модуле накачки, как видно из рис.3, результат слабо зависел от атомной концентрации ионов Nd³⁺. Так, при концентрации активатора 1.2 и 0.8 % дифференциальная эффективность генерации составляла 48 и 45 % соответственно. Однако при прочих равных условиях при концентрации активных ионов 0.8 % (рис.3,б) пороговая энергия импульса накачки была примерно на 20 % больше, нежели в случае концентрации 1.2 %.

Сравнение рис.2,а и рис.4,а показывает, что энергетические

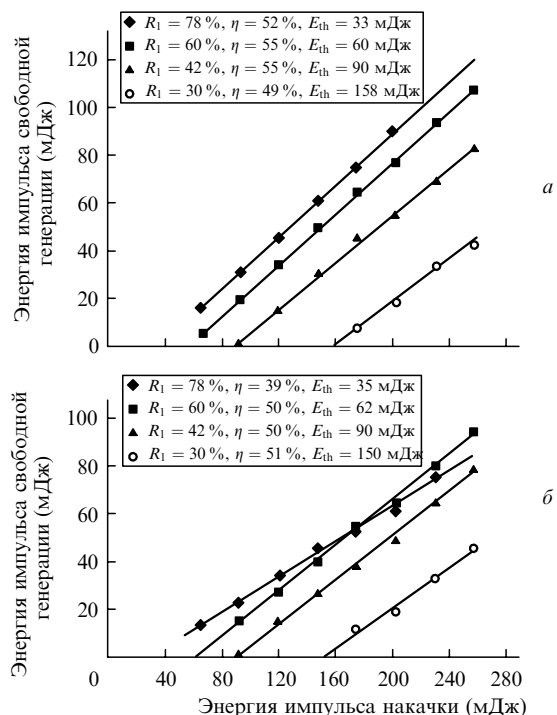


Рис.2. Энергетические параметры лазера в режиме свободной генерации с модулем накачки из двух секций по восемь ЛЛД в каждой, расположенных вокруг кристалла YAG:Nd³⁺ диаметром 5 мм, при атомной концентрации неодима 1.2 % (а) и 0.8 % (б).

параметры лазеров с симметричной схемой накачки элементами диаметрами 5 и 4 мм оказались близки друг другу. При этом, если примерное равенство дифференциальных эффективностей сравниваемых схем можно объяснить достаточно высокой степенью передачи и поглощения излучения ЛЛД в объемах обоих элементов, равенство порогов генерации свидетельствует, по-видимому, о неполном заполнении активного элемента диа-

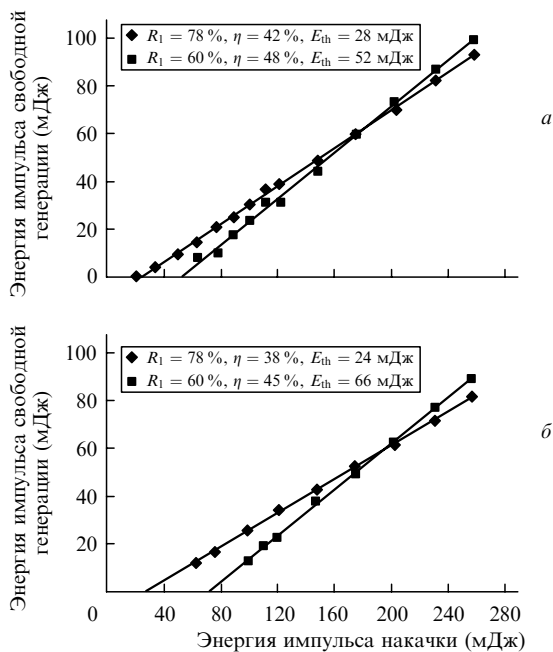


Рис.3. Энергетические параметры лазера в режиме свободной генерации с модулем накачки из двух секций по восемь ЛЛД в каждой, расположенных вокруг кристалла YAG:Nd³⁺ диаметром 4 мм, при атомной концентрации неодима 1.2 % (а) и 0.8 % (б).

метром 5 мм излучением накачки, а именно о более интенсивной прокачке его приосевой области по сравнению с периферийной.

Приведенные дифференциальные эффективности характеризуют энергетическую эффективность использования излучения ЛЛД в многомодовом режиме [9]. Таким образом, параметры системы накачки, при которых достигалась указанная максимальная эффективность, можно определить как оптимальные для исследованного режима работы. Действительно, полученные в симметричной схеме накачки дифференциальные эффективности для элементов диаметрами 5 и 4 мм свидетельствуют о высокой эффективности использования излучения ЛЛД, составляющей, за вычетом стоковых и френелевских потерь, примерно 80 %.

Существенно меньшая дифференциальная эффективность для кристалла диаметром 3 мм с отражателем (рис.4), в котором длина пробега излучения накачки составляла 6 мм, по сравнению со случаем элементов YAG: Nd³⁺ диаметрами 4 и 5 мм (см. рис.2, 3) объясняется, как упоминалось выше, особенностью использованной конструкции модуля накачки и непопаданием части излучения ЛЛД непосредственно в активный элемент. Пороговые энергии импульса накачки, приведенные на рис.2–4, характеризуют эффективный коэффициент усиления для реализованной в эксперименте пространственной структуры поля излучения [9].

Для реализации режима модуляции добротности в резонатор лазера помещались поляризатор и электрооптический затвор (ЭОЗ) на кристалле ниобата лития, работавший по четвертьволновой схеме и имевший входные грани, расположенные под углом Брюстера к оси резонатора. При использовании выходного зеркала резонатора с коэффициентом отражения 30 % нахождение в резонаторе поляризатора и ЭОЗ привело к увеличению внутрирезонаторных потерь и, как видно из рис.5 и 6, к

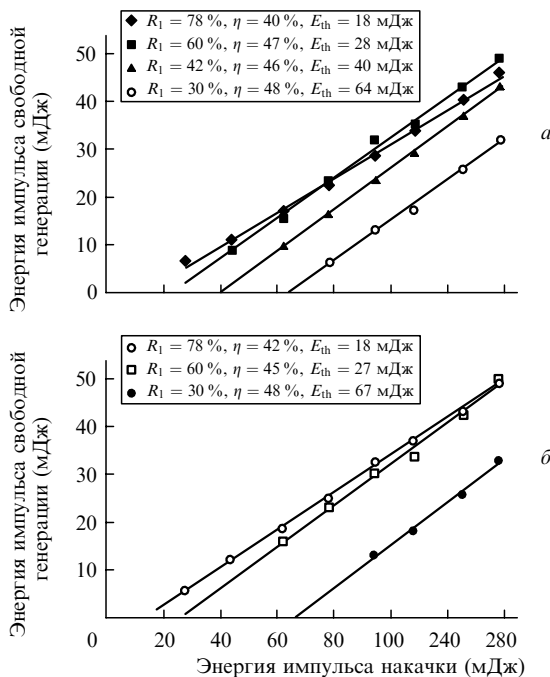


Рис.4. Энергетические параметры лазера в режиме свободной генерации с модулем накачки из трех секций по четыре ЛЛД в каждой, расположенных у кристалла YAG: Nd³⁺ диаметром 3 мм (с отражателем), при атомной концентрации неодима 1.2 % (а) и 0.8 % (б).

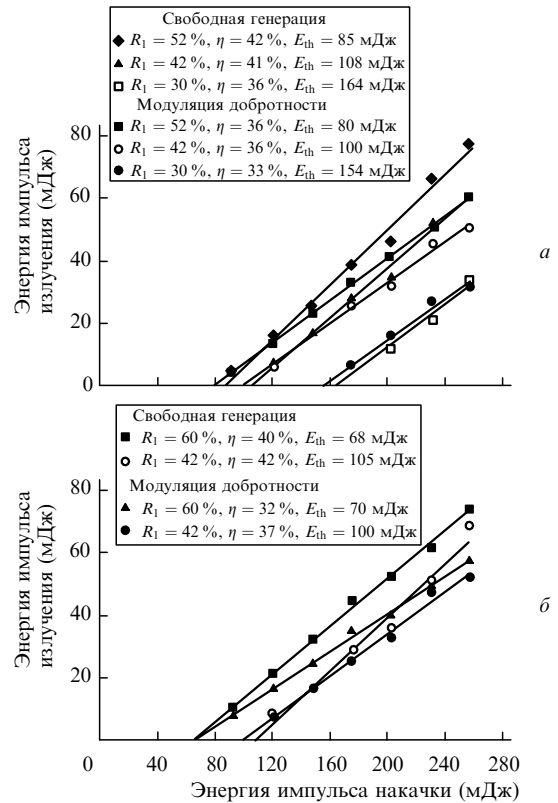


Рис.5. Энергетические параметры лазера в режимах модуляции добротности резонатора и свободной генерации с модулем накачки из двух секций по восемь ЛЛД в каждой, расположенных вокруг кристалла YAG: Nd³⁺ диаметром 5 мм, при атомной концентрации неодима 1.2 % (а) и 0.8 % (б).

снижению энергетических характеристик лазера на 20 и 25 % для активных элементов диаметрами 3 и 5 мм соответственно.

Включение добротности резонатора в проведенных экспериментах осуществлялось подачей импульсного отпирающего напряжения на ЭОЗ в момент времени, соответствовавший спаду прямоугольного импульса тока накачки ЛЛД. При этом в резонаторе лазера формировался импульс модулированной добротности – моноимпульс с энергетическими характеристиками, представленными на рис.5 и рис.6 соответственно для симметричной и несимметричной схем модуля накачки. Из полученных результатов видно, что в режиме модуляции добротности при коэффициенте отражения выходного зеркала 42 % для элемента YAG: Nd³⁺ диаметром 5 мм дифференциальная эффективность составляла примерно 36 %, для элемента YAG: Nd³⁺ диаметром 3 мм – 38 %. Снижение дифференциальной эффективности лазера при работе в этом режиме было связано как с увеличением внутрирезонаторных потерь при использовании поляризирующих элементов, так и с неоптимальностью использования прямоугольного импульса накачки длительностью 200 мкс при времени жизни инверсной населенности в кристалле YAG: Nd³⁺ 240 мкс [9].

Необходимо отметить, что при использованных схемах накачки излучение от ЛЛД, располагавшихся в одной секции, суммировалось так, что неоднородно распределенная в пространстве инверсия населенностей имела максимум вблизи оси активного элемента. Вследствие этого при энергии моноимпульса несколько десятков миллиджоулей локальная плотность мощности излу-

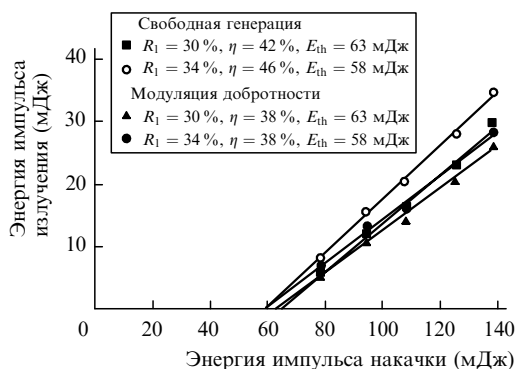


Рис.6. Энергетические параметры лазера в режимах модуляции добротности резонатора и свободной генерации с модулем накачки из трех секций по четыре ЛЛД в каждой, расположенных у кристалла YAG: Nd³⁺ диаметром 3 мм (с отражателем) и атомной концентрацией неодима 0.8 %.

ния была близка к предельно допустимой для используемых внутрирезонаторных элементов. Соответственно в режиме модуляции добротности применялись выходные зеркала с максимальным коэффициентом отражения – не более 34 % для элемента диаметром 3 мм и 60 % для элемента диаметром 5 мм.

При суммарной энергии излучения импульса накачки 140 и 250 мДж соответственно в несимметричном и симметричном модулях полученные в ходе эксперимента максимальные энергии моноимпульсов составляли 28 и 55 мДж. Полная эффективность (свет – свет) генерации YAG: Nd³⁺-лазера в режиме модуляции добротности резонатора в обоих случаях была равна 20 %. При этом пучок излучения имел неоднородную пространственную структуру, соответствовавшую, как и в случае свободной генерации, набору из определенного количества поперечных мод используемого резонатора.

Необходимо отметить, что реализованная полная эффективность лазера (20 %) не являлась максимально возможной для обеих исследованных схем накачки и в эксперименте ограничивалась как сравнительно низким коэффициентом передачи излучения (примерно 75 %) от ЛЛД к активному элементу диаметром 3 мм, так и недостаточно большим превышением энергии импульса накачки (250 мДж) над порогом генерации для активного элемента диаметром 5 мм. Данные факторы являются следствием конструктивных особенностей созданных модулей накачки и использованных ЛЛД и могут быть устранены в процессе дальнейшего исследования и усовершенствования поперечной схемы накачки цилиндрического активного элемента.

4. Заключение

Таким образом, проведенное в настоящей работе исследование позволило экспериментально определить энергетические характеристики работы YAG: Nd³⁺-лазера в режимах свободной генерации и модуляции добротности резонатора при накачке цилиндрического активного элемента линейками лазерных диодов, расположенными вокруг поверхности активного элемента. При использовании модулей накачки с симметричной схемой расположения ЛЛД относительно активного элемента диаметром 5 мм и несимметричной – относительно эле-

мента диаметром 3 мм (с отражателем) была реализована дифференциальная эффективность работы лазера в режиме свободной генерации 55 и 48 % соответственно.

При данной эффективности использования излучения ЛЛД была получена генерация в режиме модуляции добротности резонатора с энергией импульса излучения 55 и 28 мДж при накачке активных элементов диаметром 5 и 3 мм соответственно. Это позволяет сделать вывод о том, что схема модуля накачки с симметричным расположением восьми ЛЛД в каждой секции может быть принята за основу при создании систем накачки твердотельных лазеров с активным элементом диаметром 5 мм, излучающих в режиме модуляции добротности резонатора импульсы с энергией не менее 50 мДж. При этом суммарная энергия импульса излучения ЛЛД, собранных в двух последовательно расположенных секциях, должна быть не менее 250 мДж.

Схема накачки с несимметричным расположением четырех ЛЛД в секции у поверхности активного элемента YAG: Nd³⁺ с диаметром 3 мм и отражающим покрытием может быть использована в лазерах с энергией излучения в импульсе модулированной добротности не более 30 мДж. Вариация концентрации ионов неодима в кристаллах различного диаметра показала, что в выбранных схемах модулей поперечной накачки элементов различного диаметра был реализован достаточно высокий коэффициент поглощения излучения ЛЛД в активной среде, в связи с чем изменение концентрации ионов неодима в пределах 0.8 – 1.2 % не оказало существенного влияния на энергетические параметры исследованных лазеров.

Найденные экспериментально параметрические зависимости между энергетическими характеристиками лазерной генерации и параметрами модуля поперечной накачки такого конструктивного исполнения представляют интерес как исходные данные для моделирования, численной оценки и оптимизации основных энергетических параметров более сложных перспективных схем модулей накачки, позволяющих увеличить как энергию излучения в моноимпульсе (выше 100 мДж), так и частоту повторения импульсов, т. е. среднюю мощность излучения лазера.

В заключение авторам хотелось бы выразить глубокую признательность А.В.Гусеву за разработку конструкции систем накачки и Ю.М.Колышкину за разработку и изготовление источников питания ЛЛД, а также Е.И.Лебедевой и Т.Г.Гурьевой за помощь в отборе ЛЛД для эксперимента.

1. Krupke W.F. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3889**, 21 (2000).
2. Basu S., Byer R. *Appl. Opt.*, **29**, 1765 (1990).
3. Feugneut G., Pocholle J.-P. *Opt. Lett.*, **23**, 55 (1998).
4. Weber H. In *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3862**, 2 (1999).
5. Takada A., Akiyama Y., Takase T., Yoshida S., Yuasa H., Ono A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3889**, 216 (2000).
6. Kasinski J., Hughes W., DiBiase D., Burnes P., Burham R. *J. Quantum Electron.*, **28**, 977 (1992).
7. Hirano Y., Koyata Y., Yamamoto S., Kasahara K., Jajime T. *Opt. Lett.*, **24**, 679 (1999).
8. Abazadze A.J., Kolbatskov J.M., Pavlovictch V.L., Zverev G.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4350**, 25 (2000).
9. Dignonnet M.J.F., Gaeta C.J. *Appl. Opt.*, **24**, 333 (1985).
10. Saito H., Hara H., Imoto H., Harada J., Kubomura H. *Rev. Laser Eng.*, **19**, № 5, 31 (1991).