

НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 621.373.8

МОНОИМПУЛЬСНЫЕ ЛАЗЕРЫ НА АЛЮМОИТТРИЕВОМ ГРАНАТЕ С ИОНАМИ НЕОДИМА С РЕЗОНАТОРАМИ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЧЕТЫРЕХПРОХОДОВОГО УСИЛИТЕЛЯ С ПОПЕРЕЧНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

© 2021 г. А. И. Ляшенко^{а, *}, Е. М. Володина^а, С. М. Сапожников^б, А. В. Подкопаев^б

^а Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН,
ул. Бутлерова, 15, Москва, 117342 Российская Федерация

^б Научно-исследовательский институт “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха,
ул. Введенского, 3, корп. 1, Москва, 11734 Российская Федерация

*E-mail: alexs1407@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.04.2021 г.

После доработки 18.05.2021 г.

Принята к публикации 25.05.2021 г.

Представлены результаты применения в моноимпульсных лазерах на алюмоиттриевом гранате с ионами Nd^{3+} резонаторов на основе оптической схемы четырехпроходового усилителя с односторонней боковой накачкой активного элемента моноспектральными решетками лазерных диодов. Предложенные схемы резонаторов позволяют увеличить выходную энергию моноимпульсов лазерного излучения. Моноспектральные решетки с эффективным отводом тепла от лазерных диодов способны обеспечить работоспособность лазеров при увеличении частоты повторения моноимпульсов и расширении диапазона температур окружающей среды.

DOI: 10.31857/S0033849421120159

ВВЕДЕНИЕ

Моноимпульсные лазеры на алюмоиттриевом гранате с ионами Nd^{3+} (АИГ: Nd^{3+}) с поперечной накачкой активного элемента решетками лазерных диодов (РЛД) заменяют лазеры с ламповой накачкой в таких системах, в которых от лазеров требуется частота повторения импульсов в несколько десятков герц, длительный ресурс, низкое энергопотребление, низкий уровень электромагнитных помех, малые вес и габариты, работоспособность в широком диапазоне температур окружающей среды [1]. К недостаткам лазеров с диодной накачкой следует отнести прежде всего необходимость прецизионной термостабилизации лазерных диодов (ЛД) из-за смещения длины волны ЛД (808 нм) при увеличении их температуры со скоростью $0.3 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ из-за повышения температуры окружающей среды и саморазогрева ЛД при повышении частоты повторения импульсов. Это обстоятельство приводит к рассогласованию со спектром поглощения ионов Nd^{3+} и, как следствие, к падению эффективности системы накачки [2]. Для этого температуру корпуса РЛД, на который контактным способом отводится тепло, выделяющееся в ЛД, необходимо оперативно изменять с помощью термоэлементов Пельтье и си-

стемы обратной связи за время переходных процессов (~ 15 мин) в ЛД после включения лазера. Отказаться от сложной и габаритной системы прецизионного термостатирования позволяют многоспектральные РЛД, излучающие в диапазоне 790...830 нм и состоящие из нескольких (от двух до пяти) групп линеек ЛД [3, 4]. Каждая группа излучает в отличном от других групп спектральном поддиапазоне, который при определенной температуре хорошо согласуется со спектром поглощения ионов Nd^{3+} . Однако при большой частоте повторения импульсов из-за саморазогрева ЛД, как показано в [5], эффективнее использовать моноспектральные решетки. Благодаря существенному снижению тепловыделения в активном элементе при диодной накачке (примерно в три раза по сравнению с ламповой накачкой) становится возможным его охлаждение контактным способом с отводом тепла на радиатор, через который прокачивается морозостойкая жидкость [5]. В отличие от часто применяемых осесимметричных конструкций квантронов [6] с активным элементом, помещенным в прозрачную трубку, по которой протекает охлаждающая жидкость, в конструкции квантрона с радиатором отсутствует воздействие излучения РЛД на хладагент. Поэтому в качестве хладагента могут применяться морозо-

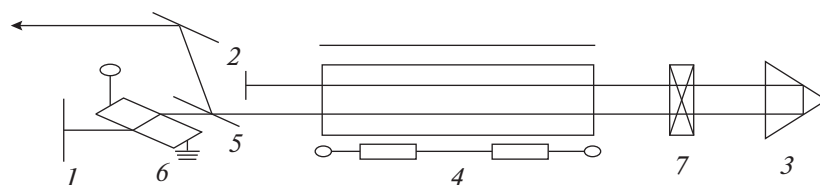


Рис. 1. Оптическая схема 1: 1 – глухое зеркало, 2 – глухое зеркало с прямолинейным краем, 3 – 90-градусная призма-крыша, 4 – квантрон с активным элементом из АИГ: Nd^{3+} , двумя РЛД и сегментом посеребренного отражателя, 5 – пластина-поляризатор, 6 – электрооптический элемент из LiNbO_3 , 7 – пластина $\lambda/4$.

стойкие жидкости (тосол, антифриз, спирт), подверженные фотодиссоциации в случае “лампового” квантрона или “диодного” квантрона осесимметричной конструкции. Новая элементная база, содержащая РЛД, которые постоянно совершенствуются, стимулирует разработчиков изменять конструкции квантронов, оптические схемы излучателей, устройство источников питания и систем охлаждения. Одна из актуальных задач при разработке лазеров на АИГ: Nd^{3+} с диодной накачкой с энергией моноимпульсов излучения 50...100 мДж и длительностью ~10 нс по уровню 0.5 от амплитуды заключается в повышении частоты повторения моноимпульсов и обеспечении работоспособности в широком диапазоне температур окружающей среды. Это необходимо для систем экологического мониторинга, технологических комплексов, авиационных лидаров.

В данной работе для решения этой задачи исследованы дополнительные возможности применения лазерных резонаторов на основе оптических схем четырехпроходовых усилителей с накачкой активного элемента моносспектральными РЛД.

1. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ КВАНТРОНА

В работах авторов [4] была предложена и испытана конструкция квантрона с односторонней боковой накачкой активного элемента из АИГ: Nd^{3+} цилиндрической формы (диаметр 8 мм, длина 100 мм) двумя последовательно соединенными моносспектральными РЛД. От корпусов РЛД и активного элемента тепло контактным способом отводилось на радиатор, охлаждаемый морозостойкой жидкостью. В результате исследования генерационных и тепловых режимов работы лазера была проведена оценка температуры лазерных диодов вследствие их саморазогрева и сделан вывод о целесообразности замены моносспектральных РЛД на моносспектральную РЛД, оптимизированную по спектральным характеристикам под выбранный режим накачки. В данной работе применен квантрон с указанным выше активным элементом, который накачивался двумя моносспектральными РЛД типа ИЛПИ-141.

Проведенные в конструкции РЛД изменения были направлены на повышение эффективности контактного отвода тепла от лазерных диодов к корпусу РЛД и на увеличение площади излучающей области. В новом квантроне был также улучшен теплоотвод от активного элемента и корпусов РЛД на радиатор и введено дополнительное воздушное охлаждение. Конструкция квантрона с односторонней боковой накачкой и односторонним теплоотводом обуславливает применение в резонаторе лазера призмы-крыши, устраняющей влияние на выходные параметры лазера как термического клина в активном элементе, так и неравномерности распределения коэффициента усиления в поперечном сечении активного элемента.

2. ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА РЕЗОНАТОРА

Расположенная рядом с торцом активного элемента призма-крыша “делит” своим ребром при 90-градусной вершине поперечное сечение элемента пополам и тем самым создает условия для построения схемы резонатора с зеркалами. Одно из зеркал имеет полностью отражающее покрытие и прямоугольный край, который параллелен ребру призмы-крыши и также “делит” поперечное сечение активного элемента пополам, а второе зеркало является частично прозрачным. Для того чтобы уменьшить лучевую нагрузку на расположенный рядом с этим зеркалом электрооптический элемент, который обладает невысокой лучевой прочностью, коэффициент пропускания зеркала выбирают меньше оптимального, что приводит к уменьшению КПД лазера. Трансформация такого резонатора в резонатор с “поляризационным” выводом излучения (рис. 1, схема 1), в котором лучевая нагрузка на электрооптический элемент заметно (примерно в два раза) снижена, позволяет сформировать при соответствующей азимутальной ориентации четвертьволновой пластины оптимальный коэффициент отражения “поляризационного” зеркала.

При небольших коэффициентах усиления в активном элементе с помощью четвертьволновой пластины, расположенной между торцом активного элемента и призмой-крышей, как показано

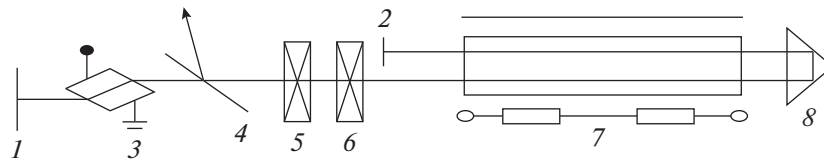


Рис. 2. Оптическая схема 2: 1 – глухое зеркало, 2 – глухое зеркало с прямолинейным краем, 3 – электрооптический элемент из LiNbO_3 , 4 – пластина-поляризатор, 5 – пластина $\lambda/4$, 6 – дополнительная четвертьволновая пластина с кристаллографическими осями под углами 0° и 90° к плоскости чертежа, 7 – активный элемент из АИГ: Nd^{3+} , 8 – 90-градусная призма-крыша.

в [5], возможно сформировать “поляризационное” зеркало с оптимальным коэффициентом отражения, несмотря на деполяризующее свойство призмы-крыши [7]. Сформировать более прозрачное оптимальное зеркало, что необходимо при повышении энергии импульсов накачки с целью увеличить выходную энергию моноимпульсов излучения лазера, как следует из [8], возможно, если принять во внимание периодическую природу поляризационных эффектов. Для этого необходимо ввести в оптическую схему еще одну четвертьволновую пластину, которая компенсирует деполяризующее свойство призмы-крыши (рис. 2, схема 2).

Как следует из расчета состояний поляризации лазерного излучения, проведенного с помощью матриц Джонса [9], на выходе четырехпроходового усилителя, положенного в основу этих оптических схем при соответствующей азимутальной ориентации четвертьволновых пластин, отношение мощности излучения, отраженного от пластины-поляризатора (5 на рис. 1 и 4 на рис. 2), к мощности излучения, падающего на него, составляет величину T_1 для схемы 1 и величину T_2 для схемы 2. Величины T_1 и T_2 рассчитываются по следующим формулам:

$$T_1 = (\sin^2 2\varphi \cos^2 2\varphi) \times (\sin \delta + \cos \delta \cos 2\varphi + \cos 2\varphi)^2, \quad (1)$$

$$T_2 = \sin^2 2\varphi (\sin \delta + \cos \delta \cos 2\varphi)^2, \quad (2)$$

где δ – фазовый сдвиг между волнами с ортогональными поляризациями из-за разного скачка фаз при полном внутреннем отражении от граней призмы-крыши, φ – угол кристаллографической оси z пластины $\lambda/4$, с плоскостью максимального пропускания пластины-поляризатора. Фазовый сдвиг δ при падении излучения по нормали на входную грань призмы-крыши составляет величину, близкую к 90° [7]:

$$\delta = 4 \arctg \sqrt{1 - 2n^{-2}}, \quad (3)$$

где n – показатель преломления материала призмы-крыши (при $n = 1.55$, $\delta = 90^\circ$).

Из формул (1), (2) следует, что в резонаторе с оптической схемой 2 (см. рис. 2) коэффициент пропускания “поляризационного” зеркала может быть установлен оптимальным в более широком диапазоне энергий импульсов накачки. Таким образом, в лазере с оптической схемой 2 возможно увеличить выходную энергию моноимпульсов излучения без увеличения лучевой нагрузки на электрооптический элемент. К тому же в схеме 2 величина коэффициента отражения “поляризационного” зеркала менее критична к повороту четвертьволновой пластины (по сравнению со схемой 1), что делает установку оптимального зеркала в режиме генерации моноимпульсов излучения более безопасной.

3. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЛАЗЕРА

Изменение коэффициента поглощения излучения накачки в активном элементе из-за рассогласования спектров приводит как к изменению эффективности системы накачки, так и к изменению распределения инверсной населенности в поперечном сечении активного элемента. Отвод тепла контактным способом от активного элемента не обеспечивает прецизионной стабилизации его температуры, что сопровождается изменениями величины поперечного сечения стимулированного излучения ионов Nd^{3+} . Эти обстоятельства могут привести к тому, что в момент включения “холодного” лазера или включения лазера после небольшой паузы длительностью несколько минут максимальная плотность энергии моноимпульсов может превысить допустимую величину и привести к оптическому пробое наиболее нестойких к излучению компонентов резонатора. Благодаря применению призмы-крыши в оптической схеме резонатора на рис. 2 создается равномерное распределение инверсной населенности в направлении активный элемент–РЛД при любом значении энергии импульсов накачки и любом спектральном составе ее излучения. При переводе лазера в режим включения добротности после окончания свободной генерации, в котором стабилизируется максимальная плотность энергии, становится возможным работать как в стационарном, так и в переходных режимах, не

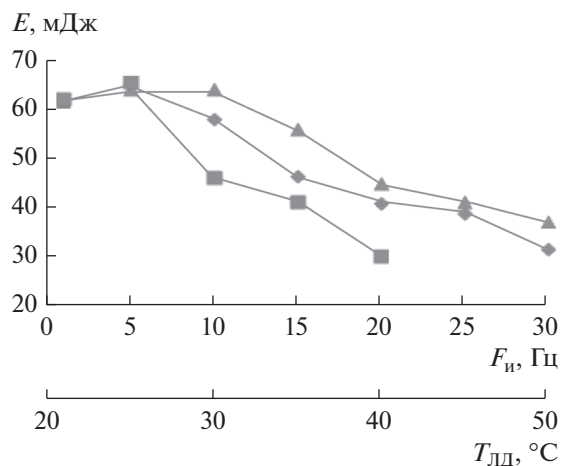


Рис. 3. Зависимость энергии E моноимпульсов излучения от частоты их повторения $F_{\text{и}}$ при различных режимах охлаждения и при температуре окружающей среды $T_{\text{ос}} = 20^\circ\text{C}$: треугольники – жидкость + воздух, ромбы – жидкость, квадраты – воздух.

подвергая лучевой перегрузке компоненты резонатора [4, 10]. Тогда дальнейшая задача стабилизации выходных энергетических параметров сводится к контролю и управлению тепловыми режимами лазера.

Оценка изменения температуры ЛД в моноспектральных РЛД в результате саморазогрева с увеличением частоты повторения импульсов, проведенная по методике, изложенной в [5], свидетельствует о значительном увеличении (в 1.5 раза) эффективности контактного отвода тепла от ЛД на корпус РЛД по сравнению с многоспектральными РЛД, рассмотренными в работах [4, 5]. Это обстоятельство вместе с конструктивными изменениями квантрона и применением воздушного (дополнительно к жидкостному) охлаждения позволяет увеличить частоту повторения импульсов и обеспечить работоспособность лазера в более широком диапазоне температур окружающей среды за счет коммутации режимов охлаждения (воздушно-жидкостного, только жидкостного, только воздушно-го). На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости энергии моноимпульсов излучения от частоты повторения моноимпульсов при различных режимах охлаждения. Значения температуры лазерных диодов $T_{\text{лд}}$, определенных по методике из [5] приведены для режима воздушно-жидкостного охлаждения.

Как видно из рисунка, при увеличении частоты повторения на 10 Гц температура лазерных диодов увеличивается на 10° вследствие их саморазогрева, а длина волны излучения диодов смещается на 3 нм, что приводит к рассогласованию спектров поглощения ионов неодима и излучения диодной накачки и, как следствие, к падению энергии моноимпульсов излучения. Увеличение

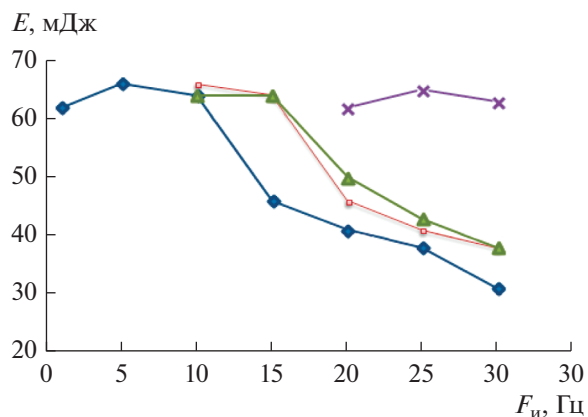


Рис. 4. Рассчитанная и экспериментальная зависимость энергии моноимпульсов излучения E от частоты их повторения $F_{\text{и}}$ при различных температурах окружающей среды $T_{\text{ос}}$: эксперимент при 20°C (ромбы) и 15°C (треугольники), расчет при 15°C (кружочки) и 0°C (крестики).

температуры лазерных диодов при снижении охлаждения приводит к более быстрой деградации энергии моноимпульсов с увеличением частоты повторения. Однако при отрицательных температурах окружающей среды отключение жидкостного охлаждения должно привести к росту энергии моноимпульсов.

Используя данные, представленные на рис. 3, с учетом эквивалентности нагрева лазерных диодов при увеличении температуры окружающей среды $T_{\text{ос}}$ на 10°C или увеличении частоты повторения на 10 Гц можно построить предполагаемые зависимости энергии моноимпульсов от частоты повторения при температурах $T_{\text{ос}}$ 15 и 0°C путем сдвига зависимости энергии моноимпульсов от частоты повторения при $T_{\text{ос}} = 20^\circ\text{C}$ на 5 и 20 Гц соответственно.

Из частотных энергетических характеристик в режиме свободной генерации, представленных на рис. 4, видно, что при $T_{\text{ос}} = 0^\circ\text{C}$ выходные энергетические параметры лазера при частоте повторения 30 Гц полностью восстанавливаются. Такой же эффект можно ожидать при $T_{\text{ос}} = 20^\circ\text{C}$, стабилизируя температуру охлаждающей жидкости вблизи 0° с помощью термоэлементов Пельтье, расположенных непосредственно в системе охлаждения, удаленной от излучателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение резонатора на основе оптической схемы четырехпроходового усилителя с двумя четвертьволновыми пластинами позволяет увеличить выходную энергию моноимпульсов излучения лазера на АИГ: Nd^{3+} с односторонней боковой накачкой активного элемента моноспектральными ре-

шетками лазерных диодов. Моноспектральные решетки с эффективным отводом тепла от лазерных диодов обеспечивают работоспособность лазеров при увеличении частоты повторения моноимпульсов и расширении диапазона температур окружающей среды с помощью коммутации различных режимов охлаждения квантрона и стабилизации температуры охлаждающей жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Koechner W.* Solid-State Laser Engineering. N. Y.: Springer, 2006.
2. *Дураев В.П., Мармалюк А.А., Падалица А.А. и др.* // Квант. электрон. 2008. № 2. С. 97.
3. *Overton G.* // Laser Focus World. 2007. V. 43. № 8.
4. *Гармаш В.М., Володина Е.М., Ляшенко А.И. и др.* // Тр. Росс. научно-технол. о-ва радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова. Сер.: Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации. Вып. XI. М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2018. С. 199.
5. *Гармаш В.М., Володина Е.М., Ляшенко А.И. и др.* // Тр. Росс. научно-технол. о-ва радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова. Сер.: Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации. Вып. XII. М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2019. С.95.
6. *Гречин С.Г., Николаев П.П.* // Квантов. электрон. 2009. Т. 39. № 1. С. 1.
7. *Ландсберг Г.С.* Оптика. М.: Наука, 1976. С. 485.
8. *Ляшенко А.И., Володина Е.М.* Моноимпульсный твердотельный лазер. Пат. РФ на полезную модель № 204719. Оpubл. 08.06.2021 в офиц. бюл. "Изобретения. Полезные модели". № 16.
9. *Молчанов В.Я., Скороцкий Г.В.* // Квант. электроника. 1971. № 4. С. 3.
10. *Ляшенко А.И.* // Физические основы приборостроения. 2017. Т. 6. № 3(25). С. 38.