

ОБМЕН ОПЫТОМ

УДК 621.373.8

РЕЗОНАТОР ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЯРКОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРОВ С НАВЕДЕННОЙ ТЕПЛОЙ ЛИНЗОЙ В АКТИВНОМ ЭЛЕМЕНТЕ

© 2014 г. В. Н. Алексеев*, доктор техн. наук; А. С. Волков**, доктор физ.-мат. наук; В. И. Либбер*

*Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор, Ленинградская область

**ООО «Интегрированные технологии», Санкт-Петербург

E-mail: av@sbor.net

Предложена схема резонатора с плоско-выпуклыми зеркалами для уменьшения угловой расходимости излучения за счет формирования большого диаметра нулевой поперечной моды. Показано, что установка активного элемента вблизи плоского зеркала позволяет значительно сократить длину резонатора лазера из-за более быстрого уменьшения числа Френеля для фокусируемого пучка. Обсуждается оптическая схема и результаты исследования характеристик лазерной системы, построенной по схеме «задающий генератор–двухпроходовой двухкаскадный усилитель». При относительно невысокой частоте следования импульсов (100 Гц) около 30% энергии импульсов теряется на выходном поляризаторе лазера. Потери энергии импульсов устранены установкой девяностоградусного вращателя поляризации излучения между каскадами усилителя.

Ключевые слова: лазер с диодной накачкой, лазерный дальномер, нулевая поперечная мода, тепловая линза.

Коды OCIS: 140.3489, 140.3410, 140.3570, 140.3280.

Поступила в редакцию 29.05.14.

Введение

Использование диодной накачки для твердотельных лазеров позволяет уменьшить их массу и габариты, снизить энергопотребление и увеличить надежность работы и долговечность. При невысоких средних мощностях излучения становится возможной реализация воздушно-го или кондуктивного охлаждения элементов лазера. Поэтому лазеры с диодной накачкой находят все более широкое применение в локациях и дальнометрии, где требуются малые габариты и высокая надежность работы [1, 2].

Высокая надежность работы и долговечность лазеров с диодной накачкой, простота в обслуживании, снижение требований по обеспечению электрической безопасности ведет к постепенному вытеснению лазеров с ламповой накачкой в технологических применениях.

В данной работе приведены результаты исследований и разработки лазеров на АИГ:Nd³⁺ для дальномеров и лазера для технологических целей, осуществленных в НИИ ОЭП.

1. Особенности использованных резонаторов для лазеров дальномеров

Использование лазеров в локации и дальнометрии требует расходимости излучения лазерного пучка близкой к дифракционному пределу для повышения дальности работы устройств. При использовании лазеров в указанных применениях требуется определять как дальность до выбранного объекта, так и измерять траектории движения объектов, что требует излучения лазерных импульсов в диапазоне от однократного до частот следования 25–100 Гц.

Увеличение энергии импульса лазера и уменьшение угловой расходимости пучка возможно только за счет генерации в лазере одной поперечной моды TEM₀₀ с диаметром близким к диаметру активного элемента (АЭ). При работе лазеров в импульсно-периодическом режиме в АЭ возникает наведенная накачкой тепловая линза [3].

Генерация в резонаторе лазера одной поперечной моды TEM₀₀ возможна при длине резонатора, когда число Френеля на зеркалах

мало и близко к $N = 1$ [4]. Для увеличения дифракционной длины резонатора с целью получения заданного значения поперечной моды в резонаторе часто используют дополнительную двухкомпонентную систему в виде телескопа Галилея [4] между “глухим” зеркалом и АЭ. Такие резонаторы используются в импульсных лазерах с генерацией одиночных импульсов, а также в непрерывных лазерах при неизменной накачке [5]. Тепловая линза АЭ компенсируется расстройкой взаимного положения элементов телескопа Галилея. Недостатком резонатора является низкая надежность работы при высоких уровнях мощности формируемого импульса из-за относительно малого диаметра пучка на отрицательной компоненте телескопа, что повышает вероятность повреждения просветляющего покрытия, лучевая прочность которого примерно в 3 раза меньше, чем у зеркальных покрытий. Использование зеркального телескопа неизбежно приводит к появлению aberrаций пучка и требует дорогих телескопов с параболическими зеркалами.

Резонатор с большим объемом моды в АЭ с выпуклым “глухим” зеркалом и вогнутым выходным зеркалом, рассчитан в [6]. Недостатком его является наличие у выходного пучка радиуса кривизны, что требует дополнительных прецизионных оптических элементов для его компенсации. Для исключения дополнительных проблем при разработке лазера дальнего номера желательно использовать плоское выходное зеркало резонатора.

Для типичных диаметров АЭ 0,3 см, 0,5 см и 0,8 см требуемые для обеспечения формирования ТЕМ₀₀ моды длины плоских эквивалентных резонаторов соответственно равны 211, 580 и 1500 см для длины волны излучения $\lambda = 1,064$ мкм.

Известно также, что у пучка, испытывающего фокусировку, число Френеля уменьшается быстрее, чем для пучка с плоским волновым фронтом.

Рассмотрим схему резонатора, представленную на рис. 1 (схема с несимметричным расположением АЭ [5]).

При распространении пучка от зеркала З1 через линзовый АЭ к зеркалу З2 резонатора он сначала имеет плоский фронт, затем начинает фокусироваться линзой АЭ. Число Френеля может быть вычислено из выражения: $N = a^2/(L_{ef}\lambda)$, где L_{ef} – расстояние, которое прошел бы плоский пучок с первоначальным радиусом a , чтобы достичь того же значения N , λ – длина вол-

ны. Эффективная длина L_{ef} равна сумме эффективных длин участков оптического тракта [4, 7]. Так, при прохождении участка с длиной l , на котором пучок имеет плоский фронт, и диаметр его не изменяется $L_{ef} = l$. При прохождении участка l с показателем преломления n $L_{ef} = l/n$. При прохождении участка l , где пучок фокусируется линзой с фокусным расстоянием f и имеет первоначальный радиус a , эффективная длина при распространении пучка равна $L_{ef} = lf/(f - l)$.

Полагая участок от зеркала З1 до линзы АЭ равным $L_1 = 15$ см и пренебрегая длиной АЭ, находим зависимость числа Френеля пучка от длины его распространения в резонаторе и фокуса внутрирезонаторной линзы. Задав $N = 1$, находим выражение для определения длины резонатора, при которой достигается число Френеля равное единице в зависимости от фокуса внутрирезонаторной линзы и радиуса a АЭ: $L = (a^2f - L_1f\lambda)/(a^2 - L_1\lambda + f\lambda)$.

На рис. 2 приведены зависимости длины резонатора $l(f)$ от фокуса f в см внутрирезона-

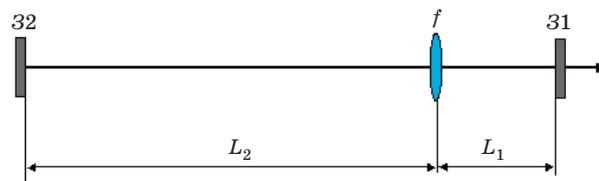


Рис. 1. Схема рассматриваемого резонатора.

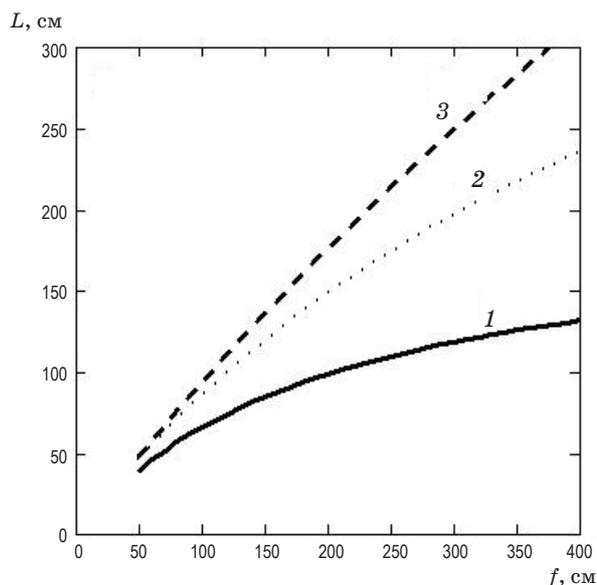


Рис. 2. Зависимость длины резонатора от фокуса f эквивалентной линзы в резонаторе для диаметров АЭ 3 мм (1), 5 мм (2) и 8 мм (3), при которой число Френеля $N = 1$.

торной линзы для АЭ с Ø3 мм $l(f)$, Ø5 мм $l_1(f)$ и Ø8 мм $l_2(f)$ для длины волны $\lambda = 1,064$ мкм. Как видно из рис. 2, при фокусном расстоянии линзы в резонаторе, например, равном $f = 200$ см, длина резонатора для АЭ Ø3 мм приблизительно равна 100 см, Ø5 мм – 150 см, а Ø8 мм – 175 см.

Первоначальный расчет резонатора в пределах гауссовой оптики дает хорошую ориентировку для дальнейших исследований, даже если в резонаторе имеются негауссовы элементы (диафрагмы с резким краем, термовозмущенный активный элемент и т.д.) [5]. Используя матричный метод расчета резонаторов для Гауссовых пучков, можно провести оценочные расчеты границ устойчивости резонаторов и диаметры нулевой поперечной моды (по уровню $1/e^2$, который соответствует уровню, равному 0,135 от максимальной интенсивности Гауссова пучка) в АЭ и на других элементах резонатора. Для этого вычисляются матрицы обхода для каждого элемента резонатора или выбранной опорной плоскости, находятся диаметры пучков на элементах, радиусы кривизны пучков [5, 8].

При использовании двух плоских зеркал в резонаторе диаметры пучков нулевой поперечной моды в АЭ получаются равными Ø1,54, Ø1,96 и Ø2,3 мм для диаметров АЭ Ø3, Ø5 и Ø8 мм соответственно. Для АЭ Ø3 мм диаметр пучка близок к 0,5 от диаметра АЭ. Для стержней большего диаметра он имеет размер уже заметно меньший половины диаметра. Единственной возможностью увеличить объем нулевой моды в стержнях большего диаметра является использование вместо плоского зеркала З2 (рис. 1) сферического выпуклого зеркала. Так, при радиусах кривизны выпуклых зеркал резонатора $R = -2200, -1000$ и -500 мм диаметры пучков в АЭ Ø3, Ø5 и Ø8 мм возрастают до Ø2, Ø3,2 и Ø5 мм по уровню $1/e^2$ соответственно.

Изменяя мощность накачки, тем самым изменяя фокус f тепловой линзы АЭ, можно сделать резонатор динамически термостабильным [5], т.е. малочувствительным к изменению диаметра моды от флуктуаций теплового фокуса. Однако, как показывают расчеты, при этом несколько уменьшается объем нулевой моды. Так, для резонатора с АЭ с диаметром Ø3 мм динамическая термостабильность резонатора достигается при тепловом фокусе $f \approx 130$ см (диаметр нулевой моды $d \approx 1,7$ мм), для резонатора с АЭ Ø5 мм при $f \approx 180$ см

($d \approx 2,95$ мм), а для резонатора с АЭ Ø8 мм при $f \approx 185$ см ($d \approx 4,4$ мм). Для всех АЭ требуется увеличение мощности накачки, чтобы тепловая линза стала короче.

Следует отметить, что динамически стабильные резонаторы чаще требуются в технологических установках. В локаторах и дальномерах вполне достаточна стабильность импульсов излучения на уровне $\pm 10\%$, т.к. дальность действия локатора слабо зависит от энергии импульса излучения.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что при наличии тепловой линзой в АЭ можно синтезировать резонаторы с большим объемом поперечной моды и с плоским волновым фронтом выходного пучка, используя сферическое “глухое” выпуклое зеркало и плоское выходное зеркало, подобрав радиус кривизны сферического зеркала. Для исключения возникновения заметной дифракции на апертуре АЭ диаметр пучка по уровню $1/e^2$ следует выбирать примерно 0,6–0,7 от диаметра АЭ.

Следует также отметить, что при выборе параметров резонатора надо учитывать более сильную фокусировку пучка на сферическом зеркале и не допускать превышения плотности энергии более чем 0,5 от порога разрушения зеркального покрытия.

В заключение отметим, что использование двух плоских зеркал не позволяет обеспечить большой объем моды в АЭ большого диаметра. Но в АЭ Ø3 мм объем моды достаточно велик для эффективного съема запасенной энергии. Использование в резонаторе линзы, дополнительной к тепловой линзе, позволяет реализовать лазер, который работает от однократного режима до частот следования 100 Гц при практически одинаковой энергии и расходимости излучения. Такой лазер реализован (см. ниже). Введенная дополнительная линза сохраняет устойчивость резонатора при однократном срабатывании лазера и при малых частотах следования импульсов.

2. Результаты экспериментального исследования лазеров дальномеров

В лазерах использованы квантроны с диодной накачкой, драйверы их питания и системы охлаждения, разработанные ООО “Интегрированные технологии” по нашим исходным данным.

Оптическая схема лазера 1 приведена на рис. 3. Он предназначен для работы в лабораторном

макете оптико-локационной системы [10]. АЭ квантрона накачивается с трех сторон 15 линейками лазерных диодов со световой мощностью 100 Вт в импульсе каждая. Импульс тока имеет амплитуду до 90 А при длительности 250–300 мкс. Активный элемент имеет размер $\text{Ø}3 \times 86 \text{ мм}^3$, накачиваемая длина около 5 см, торцы имеют радиус кривизны $R = -1 \text{ м}$ ($f = -60 \text{ см}$). От лазера требовалась энергия импульса излучения на уровне 20–25 мДж. Поэтому он работал при амплитудах импульсов тока меньших, чем максимально допустимые.

Ячейка Погкельса для модуляции добротности выполнена на основе кристалла дидейтерофосфата калия (ДКДР). Длительность импульса излучения равна 20–30 нс (рис. 4).

Зеркала резонатора плоские. Однако, за счет введения дополнительной положительной линзы, оптическая сила которой больше оптической силы торцов АЭ, резонатор является плоско-сферическим с переменным эквивалентным фокусом линзы в резонаторе. Усиление слабого сигнала АЭ на проход при токе 90 А превышает 7.

На выходе установлен трехкратный телескоп Галилея для расширения пучка и кор-

ректировки расходимости излучения в широких пределах. Распределение интенсивности люминесценции на выходном торце АЭ имеет осесимметричный вид с максимумом в центре, близкий к распределению, приведенному в нашей работе [9].

Формируемый в резонаторе пучок имеет профиль, близкий к Гауссову профилю. Характеристики пучка при работе в однократном режиме и при частоте следования 100 Гц приведены ниже.

Как показали эксперименты, выбранная схема резонатора позволяет работать в режиме старта из однократной накачки АЭ, а не только из режима постоянной накачки с частотой следования 100 Гц. Это имеет существенное значение для сбережения ресурса лазерных диодных линеек, а также может увеличить быстродействие системы (например, за счет увеличенной частоты следования импульсов в небольшом пакете импульсов до нескольких сотен Гц).

Однако следует учитывать, что в этом случае для первого и последующих импульсов будут несколько отличаться диаметры пучка, расходимость излучения и их энергия.

Основные результаты, полученные при реализации лазера 1, представлены в таблице.

АЭ лазера 2 дальномера накачивается тремя сборками кондуктивно охлаждаемых линеек по четыре 200-ваттных линеек, так что при импульсе тока 180 А полная мощность накачки АЭ $\text{Ø}5 \times 68 \text{ мм}^3$ может достигать 2400 Вт. Накачиваемая длина равна 4 см. Следует отметить, что трубка охлаждения АЭ выполнена из сапфира, на наружной части которой методом электронно-лучевого распыления нанесено отражающее покрытие из тугоплавких оксидов для длины волны 0,808 мкм со щелями напротив линеек накачки. Такое покрытие имеет высокую лучевую прочность по сравнению с серебряным покрытием, так как в нем нет поглощения излучения на длине волны накачки.

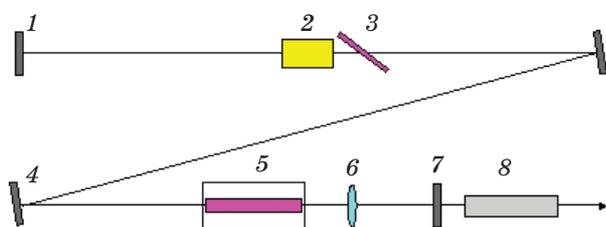


Рис. 3. Схема лазера дальномера, работающего от однократной вспышки до частоты следования импульсов 100 Гц. 1, 4, 7 — зеркала резонатора, 2 — кристалл электрооптического затвора, 3 — поляризатор, 5 — АЭ, 6 — дополнительная линза резонатора, 8 — телескоп Галилея.

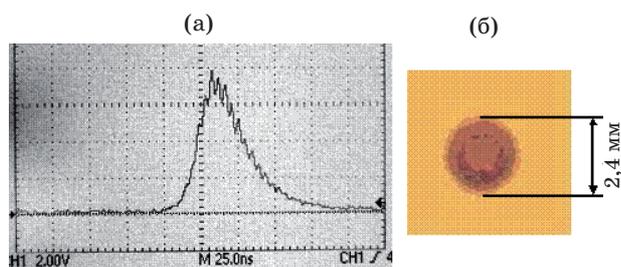


Рис. 4. Форма импульса излучения лазера (а) и ближнеполюсный отпечаток пучка (б).

Характеристики лазера 1

Характеристики лазера 1	100 Гц	1 Гц
Оптическая сила эквивалентной линзы резонатора, диоптр	0,914	0,265
Диаметры ($1/e^2$) пучков		
на "глухом" зеркале, мм	0,64	1,5
на выходном зеркале, мм	2,2	1,87
Расходимость пучка, мрад	0,31	0,36
Энергия импульсов, мДж	23	18

усилителя размером $\text{Ø}6 \times 94 \text{ мм}^3$ 25 линейками лазерных диодов мощностью 100 Вт в импульсе каждая, общая световая мощность накачки 2500 Вт. В каждом квантроне усилителя запасается энергия около 0,2 Дж. Длительность импульса накачки 250 мкс.

Распределение инверсной населенности в АЭ усилителя размером $\text{Ø}6 \times 94 \text{ мм}^3$ не такое равномерное, как в АЭ ЗГ, но максимум расположен на оси АЭ, визуально различимо на распределении, что накачка производится с пяти сторон. Тепловая линза меняется от 3,3 м до 1,7 м при изменении частоты следования импульсов накачки от 40 до 100 Гц. Усиление одного квантрона на проход превышает значение 9 при амплитуде импульса тока 90 А.

Для развязки ЗГ и усилителя, а также для защиты элементов ЗГ от деполяризованной части излучения усилителя используется изолятор Фарадея 11 на постоянных магнитах с апертурой 6 мм на кристалле TGG. Установленная перед ним 45-градусная кварцевая пластина 10 поворачивает поляризацию ЗГ, чтобы на выходе изолятора излучение имело ориентацию s-поляризации.

Четвертьволновая фазовая пластинка нулевого порядка 14 после второго прохода через нее поворачивает поляризацию отраженного от зеркала 15 излучения на 90° , в результате чего усиленное излучение выводится через поляризатор 3. Параметры оптического ретранслятора (линзы 8 и 9) выбраны таким образом, что он выполняет сразу три функции. Во-первых, он согласует апертуры пучка ЗГ и усилителя, увеличивая диаметр пучка на входе в усилитель до 4,8 мм. Во-вторых, он передает изображение пучка на зеркале ЗГ на вход усилителя. В-третьих, он делает радиус кривизны пучка на входе в усилитель таким, что после прохождения усилителя, отражения от зеркала 15 и второго прохождения пучка через усилитель волновой фронт пучка становится близким к плоскому.

При проведении экспериментов была также проверена работа системы с АЭ в усилителях диаметром 5 мм. Произошло заметное увеличение выходной энергии лазера (усиление 5-миллиметровых стержней более высокое) и улучшение распределения излучения в ближнем поле. Плоский фронт на выходе системы с активными элементами диаметром 5 мм обеспечивается при частоте 55 Гц из-за более коротких тепловых фокусов АЭ. При частоте 100 Гц пучок сходящийся.

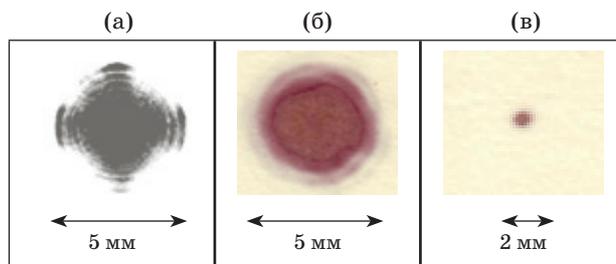


Рис. 7. Распределение излучения в пучке на выходе усилителя, искаженное потерями излучения на выходном поляризаторе, возникшими из-за двулучепреломления излучения в активных элементах усилителя (а), отпечаток выходного пучка на фотобумаге на выходе усилителя после установки пластины 13 (б) и отпечаток сильно ослабленного распределения излучения усилителя в фокусе линзы 100 см (в).

Установка вращателя поляризации 13 на 90° между каскадами усилителя позволила почти на 30% увеличить выходную энергию лазера за счет снижения потерь на выходном поляризаторе деполяризованного излучения. На рис. 7 приведены распределения излучения на выходе усилителя без вращателя поляризации 13 (а), с вращателем поляризации (б) и дальнопольное распределение пучка в фокусе линзы $f = 100 \text{ см}$ (в).

Габариты лазерной системы равны $100 \times 25 \times 15 \text{ см}^3$ (д \times ш \times в). Для питания линеек лазерных диодов использованы два источника, один для ЗГ, второй для усилителя.

Заключение

В работе рассмотрен вариант получения большого объема нулевой поперечной моды в резонаторе лазера дальномер-локатора. Выбирается длина резонатора от выходного зеркала до “глухого” сферического выпуклого зеркала, обеспечивающего число Френеля близкое к 1 с учетом фокусировки пучка тепловой линзой АЭ. Затем выбирается радиус кривизны зеркала, который обеспечивает максимальное заполнение апертуры АЭ и при этом не вызывает больших дифракционных потерь на апертуре. Выходное зеркало резонатора – плоское.

Показано, что в плоском резонаторе с АЭ небольшого диаметра с тепловой линзой и дополнительно введенной линзой можно реализовать режимы работы лазера от однократной вспышки до частот следования 100 Гц с малыми для практики изменениями энергии импульсов и расходимости пучка.

Рассчитана энергетика квантрона и разработана его конструкция, обеспечивающие энергию выходного импульса 90–100 мДж. Приведены результаты исследования характеристик лазеров для дальномеров с расходимостью близкой к дифракционному пределу для использованных диаметров АЭ.

Разработаны квантроны усилительной системы, обеспечивающие заданные энергии выходных импульсов излучения. Исследованы

характеристики лазерной системы, построенной по схеме “задающий генератор–двухпроходный двухкаскадный усилитель” с диаметрами АЭ усилителей 6 и 5 мм. Получена энергия импульсов до 350 мДж при частоте следования импульсов 100 Гц. Использование вращателя поляризации на 90° для устранения деполяризации излучения между усилительными каскадами позволило увеличить выходную энергию лазерной системы почти на 30%.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Беренберг В.А., Дороганов С.В., Мирзаева А.А., Русов В.А., Новиков Г.Е., Устюгов В.И., Халеев М.М. Моноимпульсный твердотельный лазер с полупроводниковой накачкой и килогерцовой частотой повторения импульсов генерации // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 4. С. 52–54.
2. Поляков В.М., Покровский В.П., Сомс Л.Н. Лазерный передающий модуль с переключаемой диаграммой направленности для космического аппарата “Фобос-Грунт” // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 10. С. 4–9.
3. Зверев Г.М., Голяев Ю.Д., Шалаев Е.А., Шокин А.А. Лазеры на алюмоиттриевом гранате с неодимом. М.: Радио и связь, 1985. 144 с.
4. Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и лазерные пучки. М.: Наука, 1990. 264 с.
5. Быков В.П., Силичев О.О. Лазерные резонаторы. М.: Физматлит, 2004. 320 с.
6. Носов П.А. Синтез зеркально-линзового резонатора твердотельного лазера с импульсной накачкой // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». 2012. С. 125–139.
7. Алексеев В.Н., Стариков А.Д., Чернов В.Н. Оптимизация пространственного профиля мощного светового пучка в усилительном тракте лазерной установки на неодимовом стекле // Квантовая электроника. 1979. Т. 6. С. 2374–2381.
8. Джеррард А., Берч Дж.М. Введение в матричную оптику. М.: Мир, 1978. 341 с.
9. Алексеев В.Н., Котылев В.Н., Либер В.И. Исследование характеристик излучения сканирующего лазера с активным элементом Yag:Nd³⁺ при его накачке линейками лазерных диодов и частоте следования импульсов до 400 Гц // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 9. С. 14–18.
10. Борисов М.Ф., Данилов М.Ф., Максимов А.А., Мотылев Н.Г., Павлов Н.И., Прилипко А.Я., Телятников С.В., Чилипенко А.Л. Оптико-локационная система с круговой зоной поиска: алгоритм управления исполнительными устройствами и его реализация // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 9. С. 49–55.