

Исследование расходимости излучения и энергетической эффективности импульсного $YAG:Nd^{3+}$ -лазера с поперечной накачкой линейками лазерных диодов

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

Экспериментально исследованы пространственные и энергетические характеристики излучения импульсного $YAG:Nd^{3+}$ -лазера с поперечной симметричной схемой накачки линейками лазерных диодов при вариации параметров резонатора. Определена дифференциальная эффективность излучения лазера данного типа при многомодовой и близкой к одномодовой свободной генерации, составившая в условиях проведенного эксперимента 48 % и 40 % – 42 % соответственно.

Ключевые слова: неодимовый лазер, расходимость пучка, поперечная накачка, полупроводниковая накачка.

1. Введение

Задача создания лазеров, одновременно обладающих высокой эффективностью и малой расходимостью излучения, является актуальной для многих практических применений [1]. Условиям реализации твердотельных лазеров с дифракционным качеством пучка в наибольшей степени отвечает продольная схема накачки лазерными диодами, поскольку она позволяет согласовать пространственные распределения излучения накачки и основной поперечной моды открытого резонатора. Однако применение продольной схемы накачки для увеличения энергетического потенциала становится затруднительным. Это связано с необходимостью использования матриц лазерных диодов, применение которых в продольной схеме приводит к высоким потерям излучения в сложных оптических системах формирования пучка накачки и к снижению эффективности одномодовой генерации лазера [2].

Более перспективной для решения задачи достижения высоких энергетических характеристик лазера представляется поперечная схема накачки активного элемента (АЭ) линейками лазерных диодов (ЛЛД). Она дает возможность варьировать уровень энергии накачки за счет как количества ЛЛД, расположенных в одной секции вокруг АЭ, так и общего числа секций, установленных вдоль оси элемента. Хотя поперечная схема накачки и не позволяет в полной мере согласовывать пространственные распределения интенсивностей излучения накачки и мод резонатора, в ряде работ была продемонстрирована возможность реализации на ее основе достаточно эффективных $YAG:Nd^{3+}$ -лазеров со средней мощностью излучения до 150 Вт и качеством пучка ($M^2 = 1.1$), близким к дифракционному пределу [3]. В общем случае основные пространственные характеристики излучения лазера – распределение энергии в ближнем и дальнем полях –

описываются суперпозицией (с соответствующими коэффициентами) собственных мод резонатора, для которых выполнены условия генерации [4, 5]. Формирование модового состава пучка определяется селективными свойствами резонатора и пространственным распределением плотности инверсной населенности в сечении АЭ, зависящим от конфигурации модуля накачки и поглощения излучения лазерных диодов в активной среде. Поэтому при создании лазера с необходимыми параметрами актуальной является задача экспериментального определения соотношения между пространственными и энергетическими характеристиками – расходимостью пучка излучения и дифференциальной эффективностью.

В настоящей работе экспериментально исследованы энергетические и пространственные характеристики излучения в режимах свободной генерации и модуляции добротности $YAG:Nd^{3+}$ -лазера при поперечной накачке цилиндрического АЭ линейками лазерных диодов. Цель работы – определение влияния фактора неоднородности распределения накачки и соответственно плотности инверсной населенности в сечении АЭ на энергетические и пространственные параметры излучения.

2. Параметры модуля накачки

Для проведения экспериментов был создан модуль накачки, аналогичный по конструкции исследованному в [5] модулю с симметричным расположением в одной секции восьми ЛЛД на расстоянии примерно 0.8 мм от поверхности цилиндрического АЭ (см. [5]). В отличие от предыдущей конструкции исследуемый модуль состоял не из двух, а из четырех секций по восемь ЛЛД в каждой, что позволило увеличить суммарную энергию импульса до 500 мДж. В качестве АЭ использовался кристалл $YAG:Nd^{3+}$ диаметром 5 мм с атомной концентрацией ионов Nd^{3+} 1.2 %. Линейки лазерных диодов были изготовлены в НИИ «Полнос» и обладали импульсной мощностью излучения не менее 60 Вт каждая в спектральном диапазоне 807.5–811 нм ($T = 20^\circ C$). Угловая расходимость пучка излучения ЛЛД составляла на полувысоте 10° и 45° относительно «медленной» и «быстрой» осей соответственно. Выбор модуля накачки именно такой кон-

А.Ю.Абазадзе, Г.М.Зверев, Ю.М.Колбацков. ФГУП «НИИ "Полнос" им. М.Ф.Степеля», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: mail@polyus.msk.ru; http://www.polyus.msk.ru

Поступила в редакцию 21 сентября 2003 г., после доработки – 31 марта 2004 г.

струкции объясняется ее компактностью, позволяющей минимизировать потери излучения ЛЛД при его передаче в АЭ. Как было показано в [5], при указанных параметрах ЛЛД выбранная конструкция модуля позволяла использовать до 80 % излучения диодов (без учета френелевских потерь на границе воздух – АЭ) для реализации многомодового излучения лазера при достаточно близком к аксиально-симметричному пространственном распределении поля накачки в АЭ.

Для исследуемой в настоящих экспериментах схемы накачки был выполнен в приближении геометрической оптики анализ распространения излучения от восьми ЛЛД в сечении АЭ. Полученная картина позволила сделать вывод о формировании максимумов плотности инверсной населенности примерно равной амплитуды как в центральной области с эффективным диаметром 2.2 мм, так и на периферии элемента, где сечения пучков излучения от восьми ЛЛД были минимальными. Такой характер распределения плотности инверсной населенности позволил предположить существование двух типов поперечных мод с максимальным коэффициентом усиления. К первому типу могут относиться моды низкого порядка, излучение которых сосредоточено у оси резонатора, ко второму – моды с радиальным индексом высокого порядка, снимающие инверсную населенность на периферии АЭ. Оценить влияние данных типов поперечных мод на параметры формируемого пучка можно, в частности, при исследовании энергетических и пространственных характеристик излучения лазера с использованием различных схем резонатора.

3. Методика и результаты экспериментов

В ходе экспериментов измерялись энергетические и пространственные характеристики излучения $YAG:Nd^{3+}$ -лазера, построенного на основе описанного выше модуля накачки из 32 ЛЛД. Методика эксперимента состояла в измерении энергетических характеристик (порога генерации P_{th} , выходной энергии и дифференциального КПД) и расходимости пучка лазера при фиксированной энергии импульса накачки (350 мДж) с использованием различных схем резонатора. Пространственные характеристики пучка в дальней зоне находились по известной методике измерения зависимости энергии излучения, прошедшего через диафрагму в фокальной плоскости линзы, от диаметра этой диафрагмы [6]. При этом численное значение угловой расходимости пучка определялось как отношение диаметра диафрагмы, в которую попадает 86 % полной энергии импульса излучения, к фокусному расстоянию линзы, составлявшему 50 см. Поскольку целью настоящего исследования не было изучение влияния различных термооптических эффектов на параметры излучения лазера (что представляет собой отдельную задачу), частота следования импульсов накачки ЛЛД длительностью 200 мкс составляла 5 Гц.

На первом этапе эксперимента энергетические и пространственные характеристики излучения лазера с новым четырехсекционным модулем измерялись в условиях, аналогичных реализованным в работе [5]. При этом была использована схема устойчивого плоскоферического резонатора с длиной $L = 38$ см и радиусом кривизны глухого зеркала $r_2 = 120$ см. Результаты измерений, представленные на рис. 1, 2, свидетельствуют о генерации многомодового пучка с высокой расходимостью (6.2

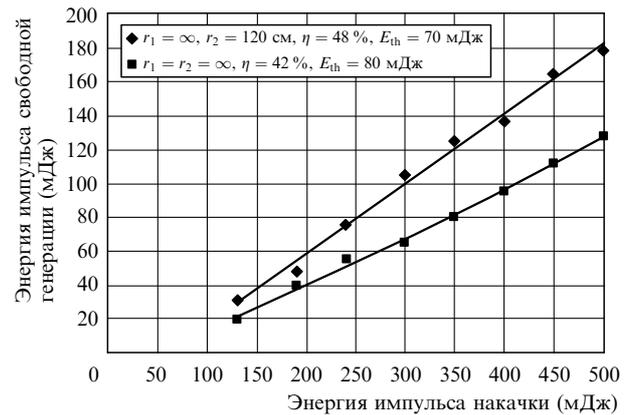


Рис. 1. Энергетические параметры $YAG:Nd^{3+}$ -лазера с длиной резонатора 38 см и плоскоферической и плоской геометрией зеркала; коэффициент отражения выходного зеркала $R_1 = 30\%$.

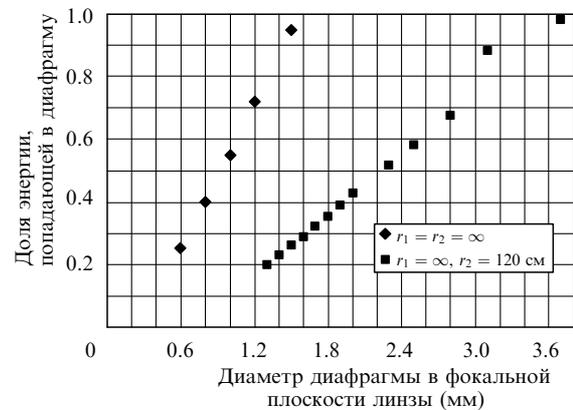


Рис. 2. Результаты измерения расходимости $YAG:Nd^{3+}$ -лазера с длиной резонатора 38 см и плоскоферической и плоской геометрией зеркала; коэффициент отражения выходного зеркала $R_1 = 30\%$.

мрад). При этом максимальная дифференциальная эффективность генерации η составляла 48 %, что несколько меньше полученного в [5] значения для модуля из 16 ЛЛД (55 %). Это можно объяснить неоптимальным согласованием более широкого спектра излучения модуля из 32 ЛЛД со спектром поглощения кристалла $YAG:Nd^{3+}$.

Известно, что при создании лазеров с малой расходимостью пучка и высокой энергией излучения используются неустойчивые резонаторы, в которых излучение мод низкого порядка эффективно заполняет объем активной среды [7]. Однако для данного типа резонатора характерен существенный рост дифракционных потерь с ростом коэффициента увеличения размера пучка за один проход излучения между зеркалами, что не позволяет реализовать высокую эффективность лазерной генерации. Поэтому в следующем эксперименте были использованы плоские зеркала при той же длине резонатора (38 см). В выбранных условиях, когда термооптическими искажениями в АЭ можно было пренебречь, резонатор такой конфигурации находился на границе областей устойчивого и неустойчивого состояний [6]. Это позволило увеличить заполнение АЭ излучением мод низкого порядка с относительно малой расходимостью, не увеличив существенно дифракционных потерь. Действительно, из рис. 1, 2 следует, что по сравнению со случаем плоскоферического устойчивого резонатора расходимость пучка уменьшилась с 6.2 до 2.6 мрад при незначительном снижении максимальной дифференциальной эффективности

генерации (с 48 % до 42 %). Однако, несмотря на положительный результат, практическое применение плоского резонатора в лазерах с высокими требованиями к стабильности работы в условиях различных внешних воздействий является нежелательным. Это связано с неустойчивостью энергетических параметров лазера при малых угловых отклонениях плоских зеркал от оптимального взаимного расположения.

Решением данной проблемы может быть использование резонатора с выпукло-вогнутой конфигурацией зеркал, находящегося в зоне устойчивости, но при этом допускающего значительное изменение диаметра основной моды именно в области АЭ [7]. В связи с этим далее был проведен эксперимент с резонатором, образованным парой зеркал с радиусами кривизны внутренней поверхности $r_1 = +64$ см для выходного зеркала с коэффициентом отражения $R_1 = 34\%$ и $r_2 = -83$ см для глухого зеркала. При этом степень устойчивости резонатора и заполнение АЭ излучением мод различного порядка варьировались изменением расстояния между этими зеркалами при фиксированном расстоянии (примерно 3 см) между выходным зеркалом и ближним к нему торцом АЭ.

Измерения энергетических и пространственных характеристик генерации проводились при длинах резонатора 25 и 58 см (рис.3, 4). Выбор данных значений L определялся только тем, что в первом случае диаметр поля основной моды (по уровню e^{-1}) был примерно в 5 раз меньше диаметра АЭ и резонатор обладал малыми дифракционными потерями для мод высокого порядка. Во втором случае потери для этих мод были более значи-

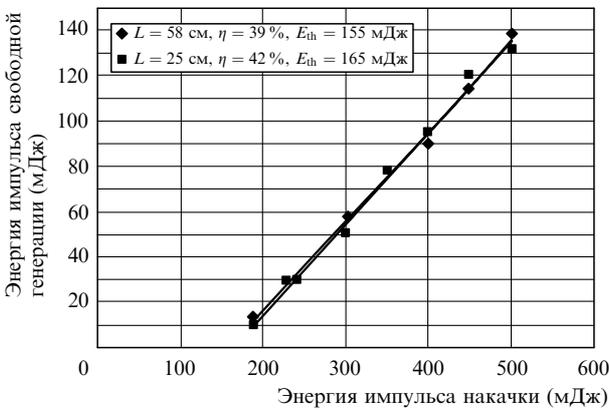


Рис.3. Энергетические параметры YAG : Nd³⁺-лазера при различных длинах выпукло-вогнутого резонатора.

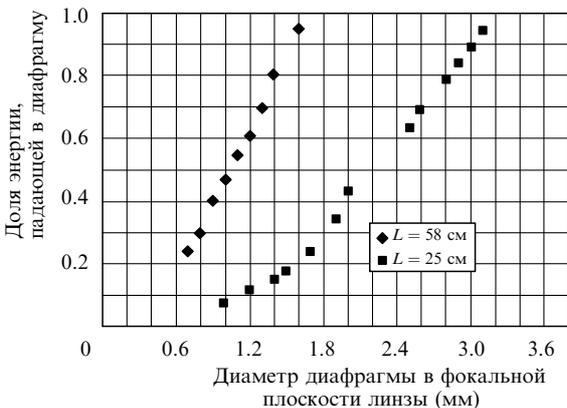


Рис.4. Результаты измерения расходимости YAG : Nd³⁺-лазера при различных длинах выпукло-вогнутого резонатора.

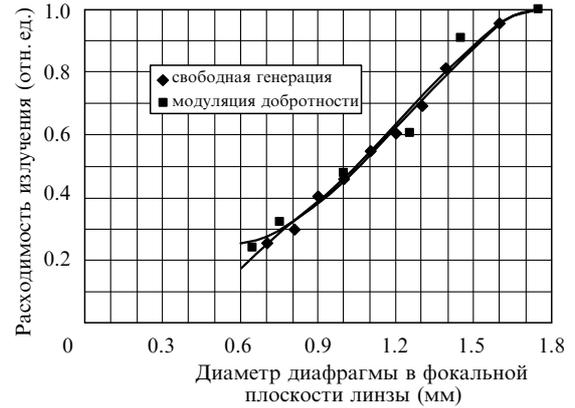


Рис.5. Результаты измерения расходимости излучения YAG : Nd³⁺-лазера с симметричной поперечной схемой накачки в режимах свободной генерации и модуляции добротности резонатора.

тельными, а диаметр пучка основной моды примерно совпадал с эффективным размером максимума плотности инверсной населенности в центре АЭ. Из результатов, полученных в этой серии экспериментов, следует, что при увеличении L до значения, близкого к критическому, расходимость пучка существенно уменьшается (с 6 до 3 мрад), тогда как энергетические параметры изменяются незначительно (см. рис.3).

Для определения влияния динамики формирования импульса излучения на процесс конкуренции поперечных мод измерялись пространственные характеристики излучения при работе лазера в режимах свободной генерации и модуляции добротности резонатора. Этот эксперимент выполнялся при выпукло-вогнутом резонаторе длиной $L = 58$ см и описанной выше геометрии зеркал. Для осуществления модуляции добротности в резонатор были помещены поляризатор и электрооптический затвор из ниобата лития, работавший по четвертьволновой схеме. На него подавались постоянное запирающее и импульсное отпирающее напряжения с длительностью фронта примерно 25 нс в момент времени, соответствовавший заднему фронту импульса тока накачки ЛЛД. Результаты эксперимента представлены на рис.5.

4. Анализ результатов экспериментов

Для количественной оценки модового состава излучения были рассчитаны матричным ABCD-методом пространственные параметры пучков основных мод для использованных в экспериментах устойчивых схем резонаторов. Результаты этих расчетов и данные измерений расходимости пучков в ходе соответствующих экспериментов приведены в табл.1. Их сравнение свидетельству-

Табл.1.

r_1 (см)	r_2 (см)	L (см)	φ_{exp} (мрад)	φ_{theor} (мрад)	D_1 (мкм)	N	D_2 (мкм)
∞	∞	38	2.6	—	—	—	—
∞	+120	38	6.2	1.6	900	7	1740
+64	-83	25	6	2	960	5	1600
+64	-83	58	3	3	1680	1	1680

Примечание: φ_{exp} , φ_{theor} — экспериментальные и теоретические углы расходимости соответственно; N — число возбуждаемых мод; D_1 — диаметр каустики основной моды в АЭ; D_2 — диаметр суммарной каустики излучаемых мод.

ет от получения в исследуемом лазере различного по модовому составу характера генерации. Реализованный в экспериментах с выпукло-вогнутым резонатором длиной 25 см и плоскосферическим резонатором длиной 38 см пучок можно охарактеризовать как сильно многомодовый (см. табл.1). При длине плоского резонатора 38 см и увеличении длины выпукло-вогнутого резонатора до 58 см в пространственном спектре излучения лазера преобладали моды с индексами низкого порядка.

Опираясь на известные свойства тонкой линзы [6], можно утверждать, что результаты измерений пространственных параметров пучка позволяют определять угловое распределение лазерного излучения в дальней зоне. А поскольку лазерная генерация представляется в виде определенной суперпозиции поперечных мод с разной расходимостью [4], то знание параметров пучка в дальней зоне позволяет оценить характер распределения энергии по модам различного порядка.

Действительно, сравнивая результаты соответствующих экспериментов, можно видеть, что для пучков резонаторов с низкой селективностью пространственное распределение излучения в дальней зоне носило более плавный характер, чем для собственных пучков резонаторов с высокой селективностью. С учетом данных табл.1 это позволяет сделать вывод о том, что в первом случае излучение было равномерно распределено по модам различного порядка и основная мода с дифракционным уровнем расходимости давала относительно малый вклад в общую суперпозицию. Во втором случае основную долю излучения составляли основная мода и моды с индексами низкого порядка, образовавшие пучок с малой расходимостью. При этом необходимо отметить, что, как видно из сравнения данных табл.1, в условиях использованной схемы накачки формирование модового состава излучения определялось именно неоднородным распределением плотности инверсной населенности в активной среде, а не дифракцией излучения на апертуре АЭ.

Это привело, в частности, к генерации пучков с несколько меньшей расходимостью, чем следует из сравнения расчетных значений размеров мод высокого порядка и апертуры АЭ (см. табл.1). Сопоставление приведенных в табл.1 результатов расчетов и экспериментально полученных значений расходимости пучков позволило найти диаметр области АЭ (1.6–1.8 мм), в которой инверсная населенность определяла условия генерации поперечных мод при всех использованных схемах резонатора. Данный диаметр области с высоким усилением находится в хорошем согласии с результатами анализа геометрии распространения излучения от ЛЛД в сечении АЭ. То, как влияют упоминавшиеся локальные максимумы инверсной населенности у поверхности АЭ на энергетические параметры излучения, можно будет понять при анализе следующих результатов.

Сравнение энергетических характеристик лазера в экспериментах с плоскосферическим и плоским резонаторами (см. рис.1) показывает, что в первом случае зависимость энергии импульса излучения от энергии импульса накачки имеет более нелинейный вид. Это свидетельствует о том, что при увеличении общего усиления растет относительный вклад в общую энергию излучения поперечных мод плоскосферического резонатора высокого порядка. В случае же плоского резонатора уровень дифракционных потерь аналогичных мод превышает максимальный уровень реализуемого коэффициента усиления,

что не позволяет эффективно использовать инверсную населенность на периферии АЭ. Однако такое уменьшение рабочего объема АС приводит лишь к незначительному (примерно на 10 %) снижению максимальной дифференциальной эффективности свободной генерации лазера. При этом увеличение объема основной моды и исключение из пучка мод высокого порядка позволяет уменьшить его полную расходимость примерно в 2 раза.

Аналогичные выводы можно сделать, сравнивая характеристики излучения $YAG:Nd^{3+}$ -лазера в эксперименте с вариацией длины выпукло-вогнутого резонатора (рис.3,4). Действительно, в этом случае изменение модового состава пучка также приводит к существенно (примерно в 3 раза) уменьшению его расходимости при сохранении энергетических параметров лазера. Совокупность приведенных фактов позволяет сделать вывод об относительно невысоком вкладе локальных максимумов инверсной населенности у поверхности АЭ в энергетические характеристики излучения лазера, за исключением случая, когда условия для генерации поперечных мод высокого порядка в устойчивом резонаторе создаются специально.

Результаты эксперимента, в ходе которого пространственные характеристики излучения $YAG:Nd^{3+}$ -лазера, работавшего в режимах свободной генерации и модуляции добротности резонатора (см. рис.5), исследовались в дальнем поле, свидетельствуют о том, что в обоих случаях состав пучка был близок к одномодовому и его расходимость имела примерно одинаковые значения. В рассматриваемых режимах работы лазера реализуемые коэффициенты усиления и динамика формирования импульса излучения существенно различались. Следовательно, полученный результат означает, что в условиях реализованного неоднородного распределения коэффициента усиления в АЭ не происходило заметных изменений пространственных характеристик излучения при вариации в широких пределах динамики формирования импульса генерации.

5. Заключение

Результаты проведенной в настоящей работе серии экспериментов свидетельствуют о том, что симметричная поперечная схема накачки цилиндрического АЭ (кристалл $YAG:Nd^{3+}$) излучением линеек лазерных диодов позволяет реализовать эффективную генерацию пучков с различными модовым составом и расходимостью при выборе соответствующих параметров резонатора. В частности, когда диаметр основной моды, увеличиваясь, составлял только 40 % диаметра АЭ, расходимость пучка примерно совпадала с расчетным значением расходимости именно данной моды в режимах свободной генерации и модуляции добротности.

Важно отметить, что при реализованном увеличении объема основной моды и уменьшении числа излучаемых поперечных мод неоднородность распределения и концентрация излучения накачки в области оси АЭ не привели к существенному снижению энергетических параметров лазера. Однако очевидным недостатком неоднородности распределения инверсной населенности в сечении АЭ является то, что оно может ограничивать максимальную энергию моноимпульса при работе лазера в режиме модуляции добротности резонатора, поскольку локальная плотность мощности способна превысить до-

пустимый уровень. В частности по этой причине при использовании в [8] модуля с поперечной накачкой излучением ЛЛД активного элемента (YAG : Nd³⁺) диаметром 3 мм и устойчивого плоскосферического резонатора максимальная энергия моноимпульса составляла всего 25 мДж.

Одним из решений данной проблемы может стать использование выпукло-вогнутого резонатора и заполнение объема АЭ излучением мод низкого порядка, что, как показали проведенные эксперименты, не должно приводить к существенному уменьшению эффективности использования излучения накачки. По-видимому, полученная в данных экспериментах расходимость пучка 2.5–3 мрад (по уровню 0.86 от полной энергии излучения) соответствует минимальному значению, которое может быть реализовано в лазере с модулем поперечной накачки АЭ диаметром 5 мм без существенного снижения эффективности генерации. Для получения эффективной генерации пучков с меньшей расходимостью необходимо использовать схемы резонатора с соответствующими параметрами поперечных мод и модули накачки с меньшими диаметрами АЭ. При этом для сохранения высоких энергетических параметров лазера он должен иметь более сложную конфигурацию (типа эффективный задающий

генератор с малой расходимостью – многоступенчатый многопроходный усилитель).

Таким образом, совокупность полученных в данной работе результатов свидетельствует о перспективности дальнейших исследований лазеров с поперечной накачкой АЭ излучением ЛЛД для создания эффективных лазеров с высокими энергетическими и пространственными параметрами генерации.

Авторы выражают благодарность А.М.Онищенко, В.Л.Павловичу, В.Н.Быкову и А.Г.Садовому за полезное обсуждение результатов проведенных экспериментов.

1. Weber H. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3826**, 2 (1999).
2. Feugnet G., Pocholle G.P. *Opt. Lett.*, **23**, 55 (1998).
3. Hirano Y., Koyata Y., Yamamoto S., Kasahara K., Jajime T. *Opt. Lett.*, **24**, 679 (1999).
4. Digonnet M. J.F., Gaeta C.J. *Appl. Opt.*, **24**, 333 (1985).
5. Абазадзе А.Ю., Зверев Г.М., Колбацков Ю.М. *Квантовая электроника*, **32**, 205 (2002).
6. Ананьев Ю.А. *Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения* (М.: Наука, 1979).
7. Вахитов Н.Г., Исаев М.П., Кушнир В.Р., Шариф Г.А. *Квантовая электроника*, **14**, 1633 (1987).
8. Abazadze A.J., Kolbatskov J.M., Pavlovitch V.L., Zverev G.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4350**, 25 (2000).