

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

**«Компенсация термо- и самонаведенных фазовых искажений излучения
в Nd:YAG и Nd:YVO₄ лазерах с высокой средней мощностью»**

Аспирант: Горбунов Иван Александрович

(подпись аспиранта)

Научный руководитель: Андреев Николай
Федорович, к. ф.-м. н., зам. зав. отд. 330

(подпись научного руководителя)

Направление подготовки:
03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки:
01.04.21 Лазерная физика

Форма обучения: очная

Нижний Новгород

2018

Актуальность темы исследования

В настоящее время лазеры с высокой средней мощностью находят широкое применение в разных областях промышленности и науки: обработка материалов, дальнометрия и дистанционное зондирование, медицина, фундаментальные исследования. Среди непрерывных лазеров с высокой средней мощностью сегодня наилучших показателей по мощности и удобству эксплуатации достигают высокоэффективные волоконные лазеры. Доступны волоконные лазеры с одномодовым излучением и мощностью до 20 кВт. Однако для множества задач требуются импульсные лазеры, характеризующиеся высокой энергией и пиковой мощностью импульса. Волоконные лазеры из-за малого размера поля моды излучения имеют существенные ограничения по пиковой мощности из-за низкого порога пробоя и нелинейных эффектов в волокне. Поэтому, для получения оптических импульсов с короткой длительностью и высокой энергией, как правило, необходимы твердотельные лазеры с объемными активными элементами (АЭ). Допустимая пиковая мощность импульсов определяется размерами лазерного пучка, и, соответственно, АЭ. Лазеры на основе объемных АЭ, как правило, достигают средней мощности от нескольких сотен Вт до нескольких кВт (см. [1] и приведенную там библиографию).

Мощность и другие параметры твердотельных лазеров зачастую ограничены тепловыми эффектами в их АЭ. Возникающие градиенты температуры приводят к искажениям фазы и деполяризации излучения, уменьшению сечения усиления в среде и даже к разрушению АЭ из-за механических напряжений [2]. Лазеры с высокой средней мощностью как правило работают в непрерывном или квазинепрерывном (импульсно-периодическом) режиме. Для квазинепрерывной накачки предполагается, что период следования импульсов много меньше характерного времени изменения профиля температуры в АЭ. Поэтому работа посвящена исследованию лазеров в стационарном тепловом режиме.

Следует рассмотреть отдельно два типа геометрии накачки цилиндрических АЭ. В случае поперечной накачки излучение накачки направляется в АЭ через боковую поверхность, а охлаждается при этом тоже боковая поверхность за счет использования прозрачной для излучения накачки охлаждающей жидкости. Ранее, приблизительно до 1990-х гг. в основном использовалась поперечная ламповая накачка, а позднее накачка лазерными диодами. В Nd:YAG лазерах эффекты тепловой линзы и термонаведенного двулучепреломления были описаны уже в начале 1970-х гг. [3] для случая однородного тепловыделения в цилиндрическом АЭ и теплоотвода с его боковой поверхности. Однако последующие исследования [4-5] показали необходимость учитывать при расчете фазовых

искажений зависимости от температуры следующих материальных параметров лазерной среды: теплопроводности k [6], линейного расширения и dn/dT [7-9], а также неоднородности профиля тепловыделения. Такой подход позволяет рассчитать более сложные фазовые искажения (сферические аберрации), возникающие в лазерах с высокой средней мощностью. Исследование возможностей компенсации таких фазовых искажений является актуальной задачей, возникающей при разработке лазеров с высокой средней мощностью.

В лазерах с продольной диодной накачкой анализ тепловых эффектов усложняется, при этом определяющую роль играет неоднородность поперечного профиля накачки. В связи с этим представляет интерес исследование возможностей оптимизации профиля продольной накачки для минимизации аберраций тепловой линзы и улучшения характеристик выходного излучения лазеров

В лазерах с высокой средней мощностью, помимо термонаведенных искажений, возникают и самонаведенные фазовые искажения излучения. При прямом усилении пикосекундных импульсов наблюдается крупномасштабная самофокусировка, которая приводит к обужению пучка и, как следствие, пробую оптических элементов. Поэтому оптимизация таких усилителей требует совместного учета термо- и самонаведенных фазовых искажений, вызванных нелинейностью среды усилителя.

Цели исследования

-исследование возможностей компенсации термонаведенных фазовых искажений излучения в Nd:YAG и Nd:YVO₄ лазерах с поперечной и продольной накачкой, в том числе сферической аберрации тепловой линзы, при помощи асферических оптических элементов или оптимизации профиля накачки

-исследование совместного влияния термонаведенных и самонаведенных фазовых искажений на параметры излучения при усилении пикосекундных импульсов в усилителях с продольной накачкой на основе Nd:YVO₄, оптимизация параметров усилителя для улучшения характеристик выходного излучения.

Научная новизна

1. Предложен метод расчета термонаведенных фазовых искажений в мощном лазерном усилителе на Nd:YAG с поперечной накачкой, основанный на измерении фокусного расстояния тепловой линзы, профиля усиления и учета зависимости характеристик АЭ от температуры.

2. Достигнута компенсация сферических aberrаций в усилителе на Nd:YAG с помощью специально разработанного и изготовленного асферического элемента. Компенсация сферической aberrации позволяет увеличить выходную энергию и качество пучка после усилителя.
3. Показано уменьшение сферических aberrаций тепловой линзы и улучшение параметра качества пучка M^2 в Nd:YAG усилителе при использовании супергауссового профиля продольной накачки по сравнению с гауссовым профилем.
4. Разработан метод формирования профиля продольной накачки, позволяющий минимизировать фазовые искажения усиливаемого лазерного пучка.
5. Достигнуто уменьшение эффекта крупномасштабной самофокусировки при усилении пикосекундных импульсов путем оптимизации профиля продольной накачки усилителя. Оптимизация позволяет значительно увеличить выходную энергию и улучшить качество пучка после усилителя.

Научная и практическая ценность работы

В работе развит подход, позволяющий компенсировать термонаведенные фазовые искажения в мощных лазерах с поперечной накачкой. Компенсация aberrаций тепловой линзы позволила разработать лазер с уникальными характеристиками. Созданный пикосекундный лазер с ВКР-компрессией импульса, работающий в безопасном для глаз диапазоне был успешно применен в системе лазерной дальнометрии.

Исследованные методы компенсации фазовых искажений были использованы при создании компактных пикосекундных лазеров с продольной диодной накачкой на основе Nd:YAG и Nd:YVO₄, которые применяются для спутниковой лазерной дальнометрии.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современной экспериментальной техники и методов. Результаты экспериментов подтверждены численной моделью, разработанной на основе собственных данных и анализа литературы по тематике работы. Основные результаты работы опубликованы в ведущих рецензируемых журналах, были представлены на международных конференциях и обсуждались на семинарах в ИПФ РАН.

Положения, выносимые на защиту

1. Термонаведенные фазовые искажения в Nd:YAG лазере могут быть эффективно компенсированы специально рассчитанным и изготовленным асферическим оптическим элементом, что позволяет улучшить характеристики излучения лазера – параметр качества пучка и выходную энергию.
2. Оптимизация профиля накачки и формы усиливаемого пучка обеспечивает эффективное снижение термонаведенных фазовых искажений в усилителях с продольной диодной накачкой.
3. Использование однородного «top-hat» профиля продольной диодной накачки позволяет увеличить эффективность Nd:YVO₄ усилителя, благодаря снижению влияния крупномасштабной самофокусировки при прямом усилении пикосекундных импульсов.

Апробация результатов

Результаты работы были представлены на международных конференциях:

-International Conference «Nonlinear Optics: East-West Reunion», Syzdal, Russia, 21-23 September, 2011.

-International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (LAT 2016), Minsk, Belarus, September 26-30, 2016

-15th International Conference “Laser Optics 2012” (LPHYS'12) St. Petersburg, Russia, June 25-29, 2012. ThR1-34

- WPLTN Technical Workshop “One-way and two-way SLR for GNSS co-located with RF techniques”, St. Petersburg, Russia, September 24-28, 2012

По теме диссертации опубликовано 2 статьи в рецензируемых научных журналах.

Личный вклад автора

Экспериментальные и теоретические исследования, представленные в работе, были выполнены автором совместно с О. В. Кулагиным. Задачи исследования были определены научным руководителем Н. Ф. Андреевым при участии автора.

Структура работы

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 58 страниц, включая 21 рисунок и 1 таблицу. Список цитируемой литературы содержит 77 источников.

Краткое содержание работы

Во введении описана актуальность работы, приведен обзор исследований по теме работы, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна и практическое применение работы, положения, выносимые на защиту и личный вклад автора.

В первой главе исследованы термонаведенные фазовые искажения в Nd:YAG лазерах с поперечной накачкой. В начале рассмотрены особенности тепловыделения в лазерах с диодной и ламповой накачкой [10, 11]. В п. 1.1 описана модель расчета термонаведенных фазовых искажений в Nd:YAG лазере с поперечной накачкой с учетом неоднородности профиля накачки и зависимости характеристик лазерной среды от температуры. Предложенная модель основана на исследованиях [3, 4, 12]. В п. 1.2 описано экспериментальное исследование термонаведенных фазовых искажений излучения в разработанном лазере с ВКР-компрессией, работающем в безопасном для глаз диапазоне [A1, A2]. Из-за высокой частоты следования 100 Гц импульсов ламповой накачки, потребовалось применение методов компенсации тепловых фазовых искажений в усилителях на основе Nd:YAG. В работе была достигнута компенсация деполяризации в усилителе лазера известными методами [13], но возникающие сферические aberrации тепловой линзы препятствовали достижению требуемых параметров лазера. Для вычисления фазовых искажений необходимо было определить величину мощности тепловыделения и его поперечный профиль в АЭ. Для оценки тепловыделения в каждом усилителе были проведены измерения фокусного расстояния тепловой линзы, а измерение профиля усиления в АЭ позволило определить неоднородность накачки и, соответственно, тепловыделения. На основе этих измерений и описанной модели были рассчитаны сферические aberrации тепловой линзы в усилителях. Оптический путь в зависимости от радиальной координаты r аппроксимировался функцией, содержащей член $\sim r^4$, который соответствует сферической aberrации. Моделирование оптической схемы лазера методами геометрической оптики позволило рассчитать профиль и положение специального асферического элемента для компенсации aberrации. Применение асферического элемента позволило увеличить выходную энергию импульса лазера и уменьшить расходимость излучения. Были измерены параметр качества пучка M^2 [14] до и после усилителей. Применение асферического элемента позволило уменьшить значение M^2 с 2.9 до 1.03, что соответствовало почти идеальному гауссовому пучку. Результаты главы были опубликованы в статьях [A1, A2] и представлены на международных конференциях [A3, A4].

Во второй главе исследованы термонаведенные фазовые искажения в Nd:YAG лазерах с продольной диодной накачкой. В п. 2.1 представлен метод расчета фазовых

искажений для произвольного радиально-симметричного распределения тепловыделения в объеме АЭ, с учетом зависимости мощности тепловыделения от продольной координаты в АЭ, основанный на подходе, описанном в п. 1.1, а также исследованиях [15-17]. В 2.2 описано экспериментальное исследовано влияние профиля продольной накачки в Nd:YAG усилителе на сферические aberrации тепловой линзы и параметр качества усиливаемого пучка. Показано хорошее соответствие результатов эксперимента и разработанной модели. Экспериментально подтверждено уменьшение сферических aberrаций тепловой линзы и улучшение параметра качества пучка M^2 в Nd:YAG усилителе при использовании супергауссового профиля продольной накачки по сравнению с гауссовым профилем. Теоретически исследованы возможности оптимизации профиля накачки и формы усиливаемого пучка в случае существенно большей мощности тепловыделения, чем в проведенном эксперименте. Показано, что при усилении супергауссова пучка ухудшение параметра качества пучка значительно ниже, чем для гауссова, а также показано преимущество однородного «top-hat» профиля накачки. В п. 2.3 рассмотрены возможности формирования заданных профилей продольной накачки при переносе излучения из многомодового волокна. Для этого была измерена диаграмма направленности излучения из волокна и измерен коэффициент поглощения накачки в АЭ. На основе измерений выполнен расчет распределения поглощенной мощности в АЭ в зависимости радиальной и продольной координаты. Используя расчет, был предложен способ формирования распределения накачки в провалом в центре с использованием короткофокусных сферических линз, который может быть использован для уменьшения сферической aberrации тепловой линзы, аналогично методу предложенному для поперечной накачки в [4]. С помощью предложенного способа в эксперименте были получены требуемые профили накачки в АЭ. Теоретически показано преимущество такого профиля по сравнению с «top-hat» при высокой мощности тепловыделения в АЭ. Результаты главы были представлены на конференциях [A5, A6], а также были использованы для разработки компактного эффективного лазера для спутниковой лазерной дальнометрии с частотой повторения импульсов 300 Гц [A6].

В третьей главе исследованы термо- и самонаведенные фазовые искажения в пикосекундных лазерах на основе Nd:YVO₄. Показано, что существенным фактором, ограничивающим выходную энергию и мощность являются самонаведенные в лазерной среде фазовые искажения усиливаемого излучения, обусловленные керровской нелинейностью среды. Достигнуто увеличение эффективности Nd:YVO₄ усилителя в результате минимизации нелинейных фазовых искажений при использовании однородного «top-hat» профиля накачки.

В заключении приведены основные результаты научно-квалификационной работы.

Список литературы

1. С. Г. Гречин, П. П. Николаев, “Квантроны твердотельных лазеров с поперечной полупроводниковой накачкой”, *Квантовая электроника*, 39:1 (2009), 1–17 [*Quantum Electron.*, 39:1 (2009), 1–17]
2. W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering*, Fifth Revised and Updated Edition. (Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 1999).
3. J. D. Foster and L. M. Osterink, “Thermal Effects in a Nd:YAG Laser”, *J. Appl. Phys.* 41, 3656 (1970)
4. N. Hodgson and H. Weber, “Influence of spherical aberration of the active medium on the performance of Nd:YAG lasers” *IEEE J. Quantum Electron.* 29, 2497-2507 (1993).
5. D. C. Brown, “Nonlinear thermal distortion in YAG rod amplifiers,” *IEEE J. Quantum*
6. G. A. Slack and D. W. Oliver, “Thermal conductivity of garnets and phonon scattering by rare-earth ions,” *Phys. Rev. B*, vol. 4, no. 2, pp. 592–609, 1971.
7. D. C. Brown, “Ultrahigh-average-power diode-pumped Nd:YAG and Yb:YAG lasers,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 33, no. 5, pp. 861–873, 1997.
8. T. Y. Fan and J. L. Daneu, “Thermal Coefficients of the Optical Path Length and Refractive Index in YAG,” *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 9, pp. 1635–1637, 1998.
9. R. Wynne, J. L. Daneu, and T. Y. Fan, “Thermal coefficients of the expansion and refractive index in YAG,” *Appl. Opt.*, vol. 38, no. 15, pp. 3282–3284, 1999.
10. T. Y. Fan, “Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 1457–1459, 1993.
11. А. В. Мезенов, Л. Н. Сомс, А. И. Степанов, *Термооптика твердотельных лазеров*, Ленинград: Машиностроение, 1986.
12. A. Montmerle Bonnefois, M. Gilbert, P.-Y. Thro and J.-M. Weulersse, “Thermal lensing and spherical aberration in high-power transversally pumped laser rods”, *Optics Communications* 259, 223-235 (2006).
13. Q. Lu, N. Kugler, H. Weber, S. Dong, N. Muller, and U. Wittrock, “A novel approach for compensation of birefringence in cylindrical Nd: YAG rods,” *Opt. Quantum Electron.*, vol. 28, no. 1, pp. 57–69, 1996.
14. A. E. Siegman, “New developments in laser resonators,” *SPIE* vol. 1224, pp. 2–14, 1990.
15. M. E. Innocenzi, H. T. Yura, C. L. Fincher, and R. A. Fields, “Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 56, no. 19, pp. 1831–1833, 1990.

16. S. B. Sutton and G. F. Albrecht, "Optical distortion in end-pumped solid-state rod lasers.," *Appl. Opt.*, vol. 32, pp. 5256–5269, 1993.
17. A. S. Dement'ev, A. Jovaisa, E. Stupak, R. Kacianauskas "Thermal stresses and end-bulging cylindrical laser rods under longitudinal diode laser pumping" *Journal of Thermal Stresses*, 37, 73-92 (2014)

Публикации автора по теме диссертации

- A1. И. А. Горбунов, О. В. Кулагин, А. М. Сергеев, "ВКР-лазер с пикосекундной длительностью импульса, работающий в безопасном для глаз диапазоне", *Квантовая электроника*, 46:10, 863–869 (2016)
- A2. O. V. Kulagin, I. A. Gorbunov, A. M. Sergeev, and M. Valley "Picosecond Raman compression laser at 1530 nm with aberration compensation" *Optics Letters*, Vol. 38, Issue 17, pp. 3237-3240 (2013)
- A3. O.V. Kulagin, I. A. Gorbunov, A.M. Sergeev and M. Valley "Thermal lensing in Nd:YAG lasers: inevitable aberrations and correction possibilities" 15th International Conference "Laser Optics 2012" (LPHYS'12) St. Petersburg, Russia, June 25-29, 2012. ThR1-34
- A4. O.V. Kulagin, I. A. Gorbunov, A.K. Kotov, A.M. Sergeev, M. Valley "Eye-safe Picosecond Nd:YAG Laser with Brillouin and Raman Pulse Compression" International Conference «Nonlinear Optics: East-West Reunion», Syzdal, Russia, 21-23 September, 2011.
- A5. I.A. Gorbunov, O.V. Kulagin, N.F. Andreev "Mitigation of Thermal Distortions in Longitudinally Diode Pumped Laser Rods", (LTuK56) International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (LAT 2016), Minsk, Belarus, September 26-30, 2016
- A6. V. Burmistrov, A. Koltsov, O. Kulagin, I. Gorbunov "Stimulated Brillouin scattering laser for precision satellite tracking" WPLTN Technical Workshop "One-way and two-way SLR for GNSS co-located with RF techniques", St. Petersburg, Russia, September 24-28, 2012