

# ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 681.7

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-205-212

## КОМПЕНСАЦИЯ АСТИГМАТИЗМА В БЛОКЕ ВРЕМЕННОГО РАСШИРЕНИЯ ИМПУЛЬСА КАНАЛА НАКАЧКИ МОЩНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ

*Алексей Викторович Лаптев*

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 15Б, младший научный сотрудник, e-mail: alex\_laptev@ngs.ru

*Глеб Владимирович Купцов*

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 15Б; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, младший научный сотрудник, e-mail: kuptsov.gleb@gmail.com

*Владимир Анатольевич Петров*

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 15Б; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, младший научный сотрудник, e-mail: petrov.nstu@gmail.com

*Виктор Валерьевич Петров*

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 15Б; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: vpetv@laser.nsc.ru

Для эффективного лазерного усиления и предотвращения пробоя оптических элементов в лазерных системах, использующих принцип усиления чирпированных импульсов, необходимо компенсировать искажения волнового фронта излучения, вызванные астигматизмом дифракционных решеток стретчера. На основе теории распространения гауссова пучка в пространстве и оптических элементах системы проведено моделирование двухлинзового телескопа для определения оптимального расстояния между линзами и значения углов их поворота, дано сравнение с экспериментальными данными. Полученные результаты могут быть использованы для снижения влияния эффекта астигматизма на качество пространственного профиля излучения при создании лазерных систем с элементами, вносящими значительный астигматизм.

**Ключевые слова:** мощный лазер, лазерный усилитель, компенсация астигматизма, диодная накачка, волновой фронт, гауссовы пучки, стретчер

### *Введение*

Развитие современных лазерных систем с высокой пиковой и средней мощностью на

основе сред, активированных трехвалентными ионами иттербия, накачиваемых узкополосным излучением диодных лазеров, позволили достичь энергии импульсов на уровне

100 мДж и 1 Дж для импульсов наносекундной и пикосекундной длительности при частоте следования 1 кГц и 500 Гц, соответственно [1, 2]. Преимуществом этих сред по сравнению с другими лазерными средами является большее время жизни верхнего лазерного уровня, что позволяет масштабировать энергию импульса при меньшем уровне накачки, а также низкий квантовый дефект (менее 1 %). Такие системы создаются для научных исследований по ускорению протонов и ионов [3], для создания компактных источников когерентного излучения в дальнем ультрафиолетовом диапазоне и рентгеновской области [4–6], для генерации ультракоротких импульсов в ультрафиолетовом и среднем инфракрасном диапазонах спектра [7, 8], для медицинских целей [9].

При генерации ультракоротких импульсов, как правило, в схеме лазера используются пара призм для компенсации дисперсии групповых скоростей и конфигурации резонатора с остаточным астигматизмом пучка на выходном зеркале. Для увеличения мощности ультракоротких импульсов широко применяется метод усиления чирпированных импульсов. Этот метод подразумевает усиление импульсов, предварительно модулированных по фазе в оптическом блоке временного расширения импульса – стретчере. При больших пиковых мощностях импульсов используют стретчеры на дифракционных решетках, которые определяют величину астигматичности излучения, поступающего в усилительные лазерные каскады. Для эффективного лазерного усиления излучения и предотвращения пробоя оптических элементов является актуальной задача компенсаций искажений волнового фронта, вызванных астигматизмом решеток. Теме компенсации астигматизма в лазерных системах, обусловленного решеточным стретчером или компрессором, посвящено не так много работ, и исследования в этой области остаются актуальными. Компенсация астигматизма в лазерном резонаторе, в котором активный элемент расположен под углом Брюстера, а также в лазерном резонаторе с синхронизацией мод, в котором активный элемент расположен по нормали, исследованы в работах [10–15].

В Институте лазерной физики разрабатывается лазерная система с высокой средней и пиковой мощностью, на основе сред, активированных иттербием, генерирующая импульсы с частотой следования 1 кГц [16–19].

Структурно система состоит из задающего генератора (ЗГ) на лазерной керамике Yb:YAG при температуре жидкого азота, блока временного расширения импульсов (БРИ) на дифракционных голографических решетках и двухлинзового телескопа, блока предварительного усиления на основе регенеративного усилителя (РУ) на кристалле Yb:KYW. Затем следует блок спектрального уширения импульса, далее излучение разделяется на два параллельных канала: параметрического усиления и накачки, в котором масштабируется энергия импульса по принципу лазерного усиления. Канал параметрического усиления включает параметрический усилитель и компрессор. Канал накачки состоит из шестипроходного усилителя при комнатной температуре активных элементов и криогенного многопроходного усилителя на кристаллах Yb:YAG. Ожидаемые выходные энергетические параметры импульса в канале накачки 300 мДж.

### Методы

Пространственные параметры пучка после БРИ определяются взаимным расположением дифракционных решеток в пространстве и параметрами линзового телескопа. В свою очередь, расположение решеток определяется из требований к временному профилю импульсов на входе в РУ. Проведенные расчеты показали, что для достижения требуемой длительности в 400 пс по уровню  $\frac{1}{2}$  на входе в РУ расстояние между ЗГ и БРИ должно составлять 1,5 м, угол падения на первую дифракционную решетку  $62^\circ$ , расстояние между решетками по перпендикуляру 2 м, расстояние от второй решетки до возвратного зеркала (рис. 1) по дифрагированному лучу – 4 м. Обе решетки являются идентичными и имеют период 1/1 700 мм.

Излучение на выходе ЗГ обладает слабым астигматизмом, обусловленным конфигурацией резонатора и активным элементом, рас-

положенным под углом Брюстера. Необходимо отметить, что параметр качества пучка  $M^2$  на выходе из ЗГ равен 1,5 и 1,7 для С (вертикальной) и Т (горизонтальной) плоскостей, соответственно. После прохождения стретчера в БРИ астигматизм пучка становится выраженным и приводит к невозможности сформировать пятно в активном элементе усилителя с площадью, обеспечивающей достаточный

коэффициент лазерного усиления. Для компенсации как внутррезонаторного астигматизма в ЗГ, так и астигматизма, возникающего в излучении при прохождении стретчера в БРИ, предложено использовать телескоп, состоящий из двух фокусирующих сферических линз  $L_1$  и  $L_2$ , расположенный после стретчера перед РУ. Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

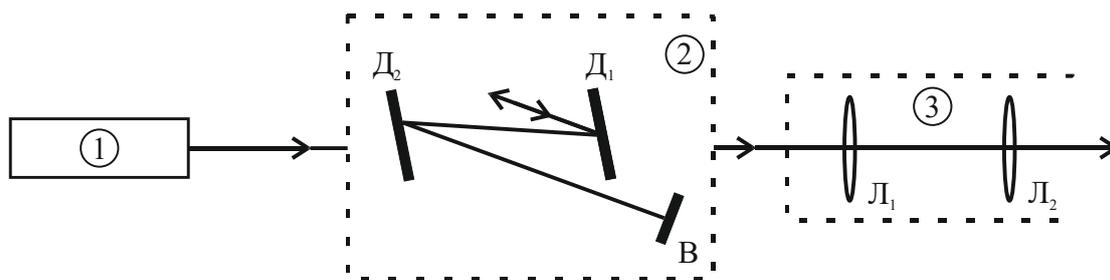


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 – задающий генератор; 2 – блок временного расширения импульса ( $D_1$  и  $D_2$  – дифракционные решетки;  $B$  – возвратное зеркало); 3 – двухлинзовый телескоп

Возвратное зеркало обеспечивает второй обход излучения через решетки посредством смещения луча по высоте.

С помощью теории параксиального приближения распространения гауссова пучка в пространстве, дифракции на голографических решетках и прохождения через тонкую линзу определялась ABCD матрица прохода излучения от задающего генератора до регенеративного усилителя.

Комплексный параметр  $q$  гауссова пучка определяется формулой [20]

$$q = \frac{1}{R} - j \cdot \frac{\lambda \cdot M^2}{\pi \cdot W^2}, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус кривизны волнового фронта;  $\lambda$  – длина волны;  $W$  – радиус пучка;  $M^2$  – параметр качества лазерного пучка.

Если обозначить  $q_1$  – комплексный параметр пучка после ЗГ, а  $q_2$  – перед РУ, тогда

$$q_2 = \frac{A \cdot q_1 + B}{C \cdot q_1 + D}, \quad (2)$$

где  $A, B, C, D$  – элементы матрицы обхода через оптическую систему.

Приравнивая действительную и мнимую часть выражений (1) и (2), получаем выражения для  $R_2$  и  $W_2$

$$R_2 = \frac{D^2 - C^2 \cdot q_1^2}{B \cdot D - A \cdot C \cdot q_1^2}; \quad (3)$$

$$W_2 = \frac{-j \cdot \lambda \cdot (D^2 - C^2 \cdot q_1^2)}{\pi \cdot q_1}. \quad (4)$$

Обозначив расстояние между линзами компенсирующего телескопа  $L_1$  и расстояние до положения перетяжки после телескопа  $L_2$ , из выражения (3), установив уравнение  $1/R_2 = 0$ , определим положение перетяжки после телескопа, как функцию расстояния между линзами, далее из (4) – радиус пучка в перетяжке, для сагиттальной (С) и тангенциальной (Т) плоскости. Т-плоскость – это плоскость, содержащая оси пучка и нормаль к поверхности; С-плоскость перпендикулярна Т-плоскости.

На рис. 2 представлены зависимости положения перетяжки от телескопа и их диаметр для С- и Т-плоскости как функции расстояния между линзами телескопа, для нормального падения излучения на линзу  $L_1$  ( $f_1 = 636$  мм) и наклонного падения на линзу  $L_2$  ( $f_2 = 171$  мм) в Т-плоскости ( $4^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ$ ).

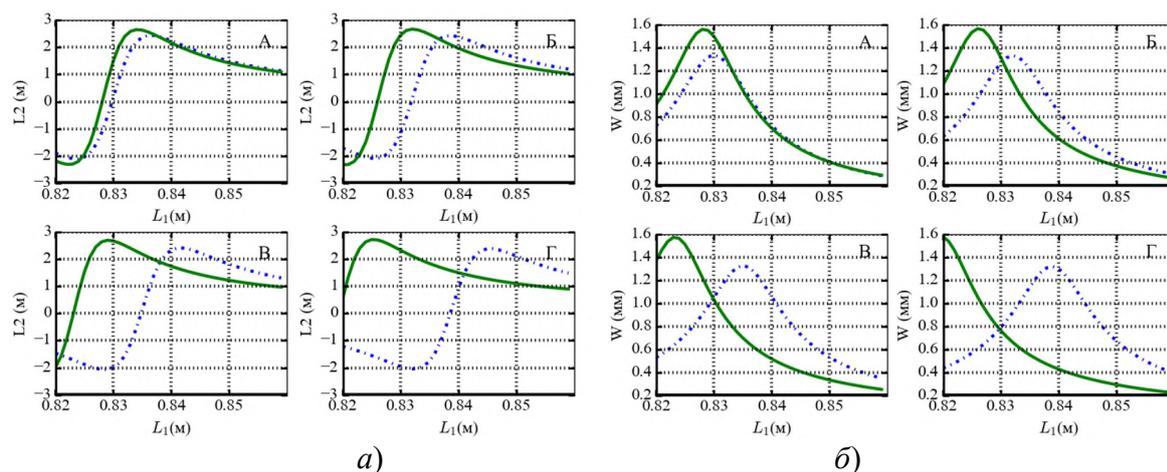


Рис. 2. Рассчитанные зависимости параметров перетяжки пучка после телескопа от расстояния между линзами:  
 а) положение перетяжки; б) радиус перетяжки

На рис. 2 кривые для различных углов падения на линзу  $L_2$  в Т-плоскости обозначены А)  $4^\circ$ ; Б)  $6^\circ$ ; В)  $8^\circ$ ; Г)  $10^\circ$ , соответственно.

Из рис. 2, а – А и рис. 2, б – А следует, что при нормальном падении излучения на линзу  $L_1$  и наклонном падении на линзу  $L_2$  в Т-плоскости ( $4^\circ$ ), можно определить такое расстояние между линзами, чтобы положение перетяжек для С- и Т-плоскостей совпали, при этом имеется возможность сфокусировать пучок в требуемый диаметр около 3 мм.

### Эксперимент

Для параметров системы, указанных в разделе «Методы», диаметр пучка после двойного прохода через стретчер составляет примерно 10 мм по уровню  $\frac{1}{2}$ . Для последующего усиления импульса в регенеративном усилителе необходимо, чтобы диаметр входного пучка был не более 3 мм по уровню  $\frac{1}{2}$ . Первая линза  $L_1$  телескопа расположена на расстоянии 3 м от дифракционной решетки  $D_1$ , а вторая линза  $L_2$ , расположенная на подвижке с микровинтом, находилась на расстоянии 83 см от  $L_1$ . Следует отметить, что поворотом линзы  $L_1$  в двух плоскостях можно достичь компенсации астигматизма перед второй линзой  $L_2$ , однако это не обеспечивает компенсацию астигматизма после телескопа, так как параметр  $M^2$  и диаметры пучка в перетяжке,

расположенной внутри телескопа, принимают разные значения.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости положения перетяжек (а) и их диаметров (б) после телескопа как функция смещения линзы  $L_2$  вдоль оси луча, для С- и Т-плоскостей, падение излучения на первую линзу соответствует нормальному, углы падения на вторую линзу для С- и Т-плоскостей  $0^\circ$  и  $4^\circ$ , соответственно. Диаметр пучка определялся с помощью ССD камеры, точность определения диаметра составляет  $\pm 14$  мкм.

Экспериментально определено, положение линзы  $L_2$  относительно линзы  $L_1$  (около 11,5 мм), при котором положение перетяжек в С- и Т-плоскостях совпадает с абсолютной погрешностью не более 2 см, величины диаметров пучка 1,15 и 1,29 мм для С- и Т-плоскостей, соответственно. Различия в расчетных и экспериментальных данных, представленных на рис. 2 (а, б) А и рис. 3 (а, б), определяются: во-первых, большим размером пучка на линзе  $L_1$  (диаметр пучка около 10 мм по уровню  $\frac{1}{2}$ ), что затрудняет установить ее по нормали к лучу с достаточной точностью, во-вторых, точностью установки расстояний между линзами телескопа, которая составляет около 5 мм, в-третьих, точностью определения положения перетяжки после телескопа, составляющей примерно 5 % от величины конфокального параметра.

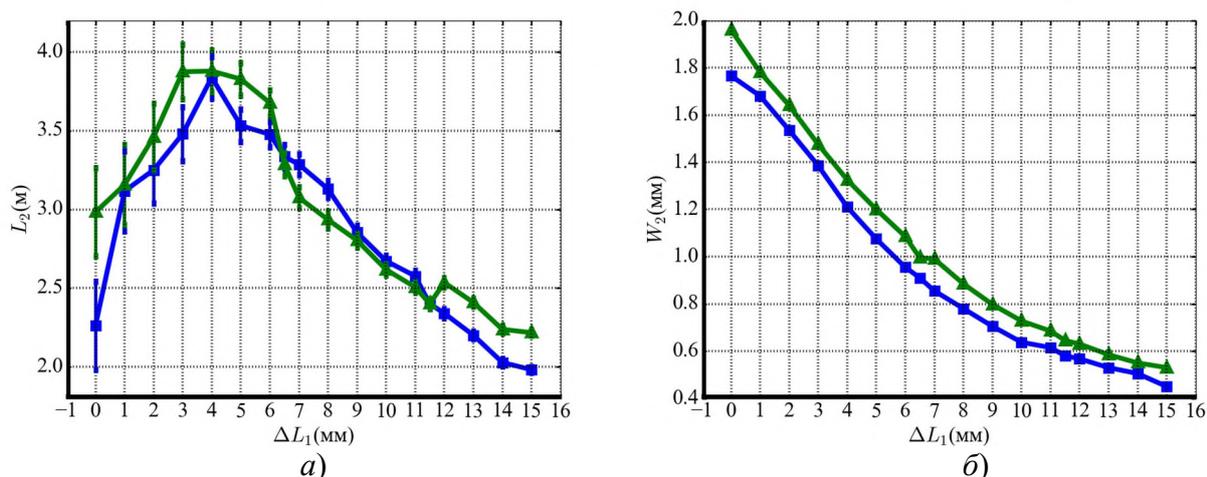


Рис. 3. Экспериментальные зависимости параметров перетяжки пучка после телескопа как функция смещения положения линзы  $L_2$  вдоль оси луча.

Квадраты и треугольники обозначают С- и Т-плоскости, соответственно:

а) положение перетяжки; б) диаметр перетяжки

### Результаты и заключение

Предложен метод по компенсации астигматизма с помощью двухлинзового телескопа на основе теории распространения гауссова пучка в пространстве и оптических элементах, проведено моделирование двухлинзового телескопа для определения оптимального расстояния между линзами и значений углов их поворота в двух плоскостях. Полученные данные согласуются с экспериментальными результатами. Проведена ком-

пенсация астигматизма в блоке временного расширения импульса в канале накачки лазерной системы с высокой средней и пиковой мощностью для эффективного лазерного усиления излучения и предотвращения пробоя оптических элементов.

Полученные результаты могут быть использованы для снижения влияния эффекта астигматизма на качество пространственного профиля излучения при создании лазерных систем с элементами, вносящими значительный астигматизм.

*Работа поддержана программой Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их взаимодействие с веществом» (№ АААА-А18-118040290036-4), частично проектами РФФИ (20-02-00529-а) и РФФИ-Новосибирской области (19-42-543007), Минобрнауки РФ (№ АААА-А17-117030310296-7).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Larionov M., Neuhaus J. Regenerative thin disk amplifier with a pulse energy of 120 mJ at 1 kHz // *Advanced Solid State Lasers OSA*. – 2014 – АTh2А.51. doi: <https://doi.org/10.1364/ASSL.2014.ATh2A.51>.
2. Baumgarten C. et al. 1 J, 0.5 kHz repetition rate picosecond laser // *Optics Letters*. – 2016. – Vol. 41 (14). – P. 3339–3342. doi: <http://dx.doi.org/10.1364/OL.41.003339>.
3. Funchs J. et al. Review of high-brightness proton & ion acceleration using pulsed lasers // *Proceedings of HB2006*. – 2016. – ТНAY04. – P. 319–323.
4. Reagan B. A., Berrill M., Wernsing K. A., Baumgarten C., Woolston M., Rocca J. J. High-average-power, 100-Hz-repetition-rate, tabletop soft-x-ray lasers at sub-15-nm wavelengths // *Phys. Rev. A*. – 2014. – Vol. 89. – P. 53820. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.89.053820>.
5. Alessi D., Martz D. H., Wang Y., Berrill M., Luther B. M., Rocca J. J. Gain-saturated 10.9 nm tabletop laser operating at 1 Hz repetition rate // *Opt. Lett.* – 2010. – Vol. 35. – P. 414–416. doi: <https://doi.org/10.1364/OL.35.000414>.

6. Pupeza I. S. et al. Compact high-repetition-rate source of coherent 100 eV radiation // *Nat. Photonics* – 2013. – Vol. 7. – P. 608–612. doi: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.156>.
7. Fattahi H. et al. Third-generation femtosecond technology // *Optica*. – 2014. – Vol. 1. – P. 45–63. doi: <https://doi.org/10.1364/OPTICA.1.000045>.
8. Schmidt B. E. et al. Frequency domain optical parametric amplification // *Nat. Commun.* – 2014. – Vol. 5. – P. 1–8. doi: <https://doi.org/10.1038/ncomms4643>.
9. Zeil K. et al. Dose-controlled irradiation of cancer cells with laser-accelerated proton pulses // *Appl. Phys. B*. – 2013. – Vol. 110 (4). – P. 437–444. doi: [10.1007/s00340-012-5275-3](https://doi.org/10.1007/s00340-012-5275-3).
10. Kogelnik H. W., Ippen E. P., Dienes A., Shank C. V. Astigmatically compensated cavities for cw dye lasers // *IEEE J. Quant. Elect.* – 1972 – Vol. 8 (3). – P. 373–379. doi: [10.1109/JQE.1972.1076964](https://doi.org/10.1109/JQE.1972.1076964).
11. Qiao W., Xiaojun Z., Yonggang W., Liqun S., Hanben N. A simple method for astigmatic compensation of folded resonator without Brewster window // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22 (3). – P. 2309–2316. doi: [10.1364/OE.22.002309](https://doi.org/10.1364/OE.22.002309).
12. Korner J., Hein J., Kaluza M. C. Compact aberration-free relay-imaging multi-pass layouts for high-energy laser amplifiers // *Applied Sciences*. – 2016. – Vol. 6 (353). – P. 1–18. doi: [10.3390/app6110353](https://doi.org/10.3390/app6110353).
13. Li K., Dienes A., Whinnery J. R. Stability and astigmatic compensation analysis of five-mirror cavity for mode-locked dye lasers // *Applied Optics*. – 1981. – Vol. 20 (3). – P. 407–411. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.20.000407>.
14. Li K. Stability and astigmatic analysis of a six-mirror ring cavity for mode-locked dye lasers // *Applied Optics*. – 1982. – Vol. 21 (5). – P. 967–970. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.21.000967>.
15. Cojocaru E., Julea T., Herisanu N. Stability and astigmatic compensation analysis of five- and six- or seven-mirror cavities for mode-locked dye lasers // *Applied Optics*. – 1989. – Vol. 28 (13). – P. 2577–2580. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.28.002577>.
16. Petrov V. V., Laptev A. V., Kuptsov G. V., Petrov V. A., Kirpichnikov A. V., Pestryakov E. V. The evolution of cryogenically cooled pump channel of high-intensity laser system with 1 kHz repetition rate // *Proceedings of SPIE*. – 2018. – Vol. 10614. – P. 1061419. doi: [10.1117/12.2303503](https://doi.org/10.1117/12.2303503).
17. Kuptsov G. V., Petrov V. V., Petrov V. A., Laptev A. V., Kirpichnikov A. V., Pestryakov E. V. The multidisk diode-pumped high power Yb:YAG laser amplifier of high-intensity laser system with 1 kHz repetition rate // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 999. – 2018. – Vol. 012008. – P. 1–5. doi: [10.1088/1742-6596/999/1/012008](https://doi.org/10.1088/1742-6596/999/1/012008).
18. Купцов Г. В., Лаптев А. В., Петров В. А., Петров В. В., Пестряков Е. В. Исследование особенностей тепловой линзы в активном элементе лазерного усилителя при мощной диодной накачке // *Вестник СГУГиТ*. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 220–228. doi: [10.33764/2411-1759-2019-24-2-220-228](https://doi.org/10.33764/2411-1759-2019-24-2-220-228).
19. Петров В. В., Петров В. А., Купцов Г. В., Лаптев А. В., Кирпичников А. В., Пестряков Е. В. Моделирование процесса лазерного усиления с учетом зависимости теплофизических и лазерных характеристик среды от распределения температуры в активном элементе Yb:YAG // *Квантовая электроника*. – 2020 – Т. 50 (4). – С. 315–320. doi: [http://dx.doi.org/10.1070/QEL17308](https://doi.org/10.1070/QEL17308).
20. Kogelnik H., Li T. Laser beams and resonators // *Applied Optics*. – 1966. – Vol. 5 (10). – P. 1550–1567. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.5.001550>.

Получено 06.07.2020

© А. В. Лантев, Г. В. Купцов, В. А. Петров, В. В. Петров, 2020

## ASTIGMATISM COMPENSATION IN BLOCK OF TEMPORAL BROADENING OF PULSE FOR PUMP CHANNEL OF HIGH POWER LASER SYSTEM

*Alexei V. Laptev*

Institute of Laser Physics SB RAS, 15B, Akademika Lavrentyev's Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, e-mail: [alex\\_laptev@ngs.ru](mailto:alex_laptev@ngs.ru)

*Gleb V. Kuptsov*

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia; Institute of Laser Physics SB RAS, 15B, Akademika Lavrentyev's Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, e-mail: [kuptsov.gleb@gmail.com](mailto:kuptsov.gleb@gmail.com)

**Vladimir A. Petrov**

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia; Institute of Laser Physics SB RAS, 15B, Akademika Lavrentyev's Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, e-mail: petrov.nstu@gmail.com

**Victor V. Petrov**

Institute of Laser Physics SB RAS, 15B, Akademika Lavrentyev's Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia; Novosibirsk State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia, Ph. D, Senior Researcher, e-mail: vpetv@laser.nsc.ru

A high peak and high average power femtosecond laser system based on media doped with Yb<sup>3+</sup> ions is being developed at the Institute of Laser Physics of the SB RAS. For efficient laser amplification and to avoid optical damage is actually to compensate wave front distortion caused by grating astigmatism in pump channel. Based on theory of propagation of gaussian beam in space and through optical elements the calculation of optimal parameters of two lenses telescope and comparison with experimental data has been performed. The obtained results can be used for decrease of astigmatic effect on beam profile quality in design of laser systems with elements involving astigmatism.

**Keywords:** high power laser, laser amplifier, compensation of astigmatism, diode pump, wavefront, gaussian beams, stretcher

REFERENCES

1. Larionov, M., & Neuhaus, J. (2014). Regenerative thin disk amplifier with a pulse energy of 120 mJ at 1 kHz. *Advanced Solid State Lasers OSA*, ATh2A.51. doi: <https://doi.org/10.1364/ASSL.2014.ATh2A.51>.
2. Baumgarten, C., & et al. (2016). 1 J, 0.5 kHz repetition rate picosecond laser. *Optics Letters*, 41(14), 3339–3342. doi: <http://dx.doi.org/10.1364/OL.41.003339>.
3. Funchs, J., & et al. (2016). Review of high-brightness proton & ion acceleration using pulsed lasers. *Proceedings of HB2006*, THAY04, 319–323.
4. Reagan, B. A., Berrill, M., Wernsing, K. A., Baumgarten, C., Woolston, M., & Rocca, J. J. (2014). High-average-power, 100-Hz-repetition-rate, tabletop soft-x-ray lasers at sub-15-nm wavelengths. *Phys. Rev. A.*, 89, P. 53820. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.89.053820>.
5. Alessi, D., Martz, D. H., Wang, Y., Berrill, M., Luther, B. M., & Rocca, J. J. (2010). Gain-saturated 10.9 nm tabletop laser operating at 1 Hz repetition rate. *Opt. Lett.*, 35, 414–416. doi: <https://doi.org/10.1364/OL.35.000414>.
6. Pupeza, I. S., & et al. (2013). Compact high-repetition-rate source of coherent 100 eV radiation. *Nat. Photonics*, 7, 608–612. doi: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.156>.
7. Fattahi, H., & et al. (2014). Third-generation femtosecond technology. *Optica*, 1, 45–63. doi: <https://doi.org/10.1364/OPTICA.1.000045>.
8. Schmidt, B. E., & et al. (2014). Frequency domain optical parametric amplification. *Nat. Commun.*, 5, 1–8. doi: <https://doi.org/10.1038/ncomms4643>.
9. Zeil, K., et al. (2013). Dose-controlled irradiation of cancer cells with laser-accelerated proton pulses. *Appl. Phys. B.*, 110(4), 437–444. doi: 10.1007/s00340-012-5275-3.
10. Kogelnik, H. W., Ippen, E. P., Dienes, A., & Shank, C. V. (1972). Astigmatically compensated cavities for cw dye lasers. *IEEE J. Quant. Elect.*, 8(3), 373–379. doi: 10.1109/JQE.1972.1076964.
11. Qiao, W., Xiaojun, Z., Yonggang, W., Liqun, S., & Hanben N. (2014). A simple method for astigmatic compensation of folded resonator with out Brewster window. *Optics Express*, 22(3), 2309–2316. doi: 10.1364/OE.22.002309.
12. Korner, J., Hein, J., & Kaluza, M. C. (2016). Compact aberration-free relay-imaging multi-pass layouts for high-energy laser amplifiers. *Applied Sciences*, 6(353), 1–18. doi: 10.3390/app6110353.
13. Li, K., Dienes, A., & Whinnery, J. R. (1981). Stability and astigmatic compensation analysis of five-mirror cavity for mode-locked dye lasers. *Applied Optics*, 2(3), 407–411. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.20.000407>.
14. Li, K. (1982). Stability and astigmatic analysis of a six-mirror ring cavity for mode-locked dye lasers. *Applied Optics*, 21(5), 967–970. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.21.000967>.

15. Cojocaru, E., Julea, T., & Herisanu, N. (1989). Stability and astigmatic compensation analysis of five- and six- or seven-mirror cavities for mode-locked dye lasers. *Applied Optics*, 28(13), 2577–2580. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.28.002577>.
16. Petrov, V. V., Laptev, A. V., Kuptsov, G. V., Petrov, V. A., Kirpichnikov, & A. V., Pestryakov, E. V. (2018). The evolution of cryogenically cooled pump channel of high-intensity laser system with 1 kHz repetition rate. *Proceedings of SPIE*, 10614, P. 1061419. doi: 10.1117/12.2303503.
17. Kuptsov, G. V., Petrov, V. V., Petrov, V. A., Laptev, A. V., Kirpichnikov, A. V., & Pestryakov, E. V. (2018). The multidisk diode-pumped high power Yb:YAG laser amplifier of high-intensity laser system with 1 kHz repetition rate. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 999, 012008, 1–5. doi: 10.1088/1742-6596/999/1/012008.
18. Kuptsov, G. V., Laptev, A. V., Petrov, V. A., Petrov, V. V., & Pestryakov, E. V. (2019). The investigation of thermal lens properties in the active element of laser amplifier with high power diode pump. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(2), 220–228. doi: 10.33764/2411-1759-2019-24-2-220-228.
19. Petrov, V. V., Petrov, V. A., Kuptsov, G. V., Laptev, A. V., Kirpichnikov, A. V., & Pestryakov, E. V. (2020). Modelling of the laser amplification process with allowance for the effect of the temperature distribution in an Yb:YAG gain element on the thermophysical and lasing characteristics of the medium. *Quantum Electronics*, 50(4), 315–320. doi: <http://dx.doi.org/10.1070/QEL17308>.
20. Kogelnik, H., & Li, T. (1966). Laser beams and resonators. *Applied Optics*, 5(10), 1550–1567. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.5.001550>.

Received 06.07.2020

© A. V. Laptev, G. V. Kuptsov, V. A. Petrov, V. V. Petrov, 2020