

ИНЖЕНЕРНЫЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ ФОКУСИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

Д.В. Вагин

dmitryvagin@mail.ru

SPIN-код: 4863-5126

А.П. Симонов

cimonovleshka@yandex.ru

SPIN-код: 7469-8023

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрена проблема адаптации методики расчета диаметра сфокусированного пучка лазерного излучения при известной расходимости лазерного луча, для расчета оптического тракта волоконного лазера. Получена зависимость диаметра сфокусированного пучка лазерного излучения при известных параметрах качества лазерного излучения BPP и M^2 , которые широко применяются для описания параметров современных волоконных лазеров. Получено аналитическое выражение для вычисления оптимального фокусного расстояния. Представлена номограмма для определения фокусного расстояния оптического тракта волоконного лазера при различных значениях аберрационных характеристик линз. Разработана методика определения оптимального фокусного расстояния оптической системы волоконных лазеров при известных параметрах лазерного излучения и коллиматора.

Ключевые слова

Волоконный лазер, лазерно-оптическая система, искажения лазерного пучка, качество лазерного излучения, оптимальное фокусное расстояние, диаметр пучка лазерного излучения

Поступила в редакцию 24.05.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Как правило, перед разработчиками фокусирующих лазерное излучение систем для сварки и резки стоит задача получения минимального диаметра пятна в фокусе системы. Зачастую это необходимо для локализации объема обработки, уменьшения объема зоны термического влияния, получения «кинжального проплавления» при сварке и т. п. Эту задачу решают с помощью оптимизации оптической системы по фокусному расстоянию. Оптимизация заключается в том, чтобы при данных аберрационных характеристиках фокусирующей системы (определяются конструктивными параметрами и материалами элементов системы) и параметрах лазерного луча конкретной установки найти такое фокусное расстояние системы и ее параметры, при которых диаметр пятна в фокусе минимален. При этом достигается максимальная концентрация энергии [1].

Полный размер пятна в плоскости наилучшей установки можно представить как сумму двух слагаемых [2]: первое — аберрационная составляющая диаметра пятна d_a ; второе — дифракционная составляющая диаметра пятна d_θ , мм:

$$d_n = d_a + d_\theta. \quad (1)$$

Графически эту зависимость можно представить в виде, показанном на рис. 1.

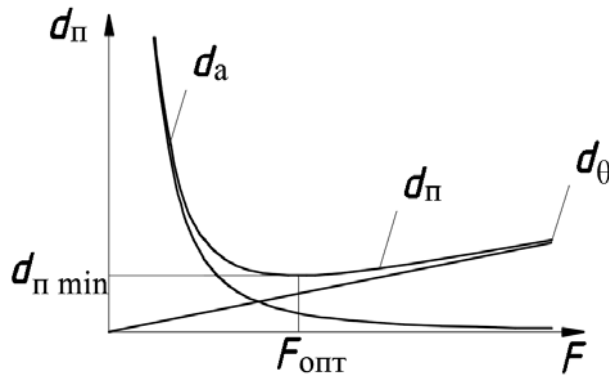


Рис. 1. Зависимость диаметра пятна от фокусного расстояния

Из графиков видно, что минимальный диаметр пятна $d_{П\ min}$ получается при оптимальном фокусном расстоянии системы $F_{опт}$ [графическое решение уравнения (1)].

Существует методика расчета [2] диаметра пятна при известной расходимости $\theta_{0,868}$ лазерного пучка:

$$d_{П\ min} = \frac{PD^3}{32F_{опт}^2} + \theta_{0,868} F_{опт}. \quad (2)$$

Данный аппарат применяется для лазерных установок старого образца. Для оценки качества пучков современных волоконных лазеров используются такие параметры, как Beam Parameter Product (*BPP*), определяющийся как произведение радиуса пучка в плоскости перетяжки на его угловую расходимость в дальнем поле, и M^2 [3, 4]

$$BPP = W_0 \theta_0 = \frac{\lambda}{\pi} M^2.$$

В этом соотношении W_0 — радиус перетяжки; θ_0 — угол расходимости в дальней зоне; λ — длина волны лазерного излучения; M^2 — безразмерный параметр, определяющий для реального пучка и идеального гауссова пучка моды TEM_{00} различие произведений диаметра перетяжки и угловой расходимости. Иногда используют «критерии $M^2 = 1$, : для идеального гауссова пучка $M^2 = 1$, а для реального $M^2 > 1$.

В данной работе представлена методика расчета диаметра пятна, а также поиск оптимального фокусного расстояния при известном качестве пучка, диаметра транспортного волокна и фокусного расстояния коллиматора.

При известных параметрах *BPP* или M^2 дифракционную составляющую вычисляют следующим образом [5]:

$$d_{BPP} = \frac{4F \cdot BPP}{D}; \quad (3)$$

$$d_{M^2} = \frac{4FM^2\lambda}{D\pi}. \quad (4)$$

Подставляя дифракционную составляющую (3) в формулу (2), получаем выражение для определения диаметра пятна при известном BPP :

$$d_n = \frac{PD^3}{32F^2} + \frac{4F \cdot BPP}{D}.$$

Подставляя дифракционную составляющую (4) в формулу (2), получаем выражение для определения диаметра пятна при известном M^2 :

$$d_n = \frac{PD^3}{32F^2} + \frac{4FM^2\lambda}{D\pi},$$

где P — абберационный параметр линзы, зависящий только от формы и материала линзы; D — диаметр лазерного луча на коллиматоре; F — фокусное расстояние линзы.

Диаметр лазерного луча на коллиматоре D вычисляют по формуле

$$D = 4 \frac{F_k}{d_v} BPP$$

при диаметре перетяжки принятом равным диаметру волокна [6, 7].

При известном M^2 :

$$D = 4 \frac{F_k}{d_v} \frac{M^2\lambda}{\pi},$$

где F_k — фокусное расстояние коллимирующей линзы; d_v — диаметр волокна.

Поскольку отношение F_k/d_v может принимать одинаковые значения, заменим его безразмерным параметром $X = F_k/d_v$, тогда окончательная формула имеет вид

$$D = 4X \cdot BPP.$$

При известном M^2

$$D = 4X \frac{M^2\lambda}{\pi}.$$

Таким образом, получена формула для определения диаметра пятна d_n при известных параметрах оптической системы, качества пучка и диаметра транспортного волокна.

Для поиска оптимального фокусного расстояния получено аналитическое выражение

$$F_{\text{опт}} = \sqrt[3]{4P \cdot X^3 BPP^3} ;$$

При известном M^2

$$F_{\text{опт}} = \sqrt[3]{4P \cdot X^3 \left(\frac{M^2 \lambda}{\pi} \right)^3} .$$

Формулы описывают поверхность значений оптимального фокуса для различных комбинаций параметров X и BPP или M^2 соответственно.

На практике нам доступны только определенные фокусные расстояния [8]. Поэтому удобно построить линии уровня соответствующие доступным фокусным расстояниям. На рис. 2, построенном с помощью системы Mathcad, представлены линии уровня для некоторых фокусных расстояний.

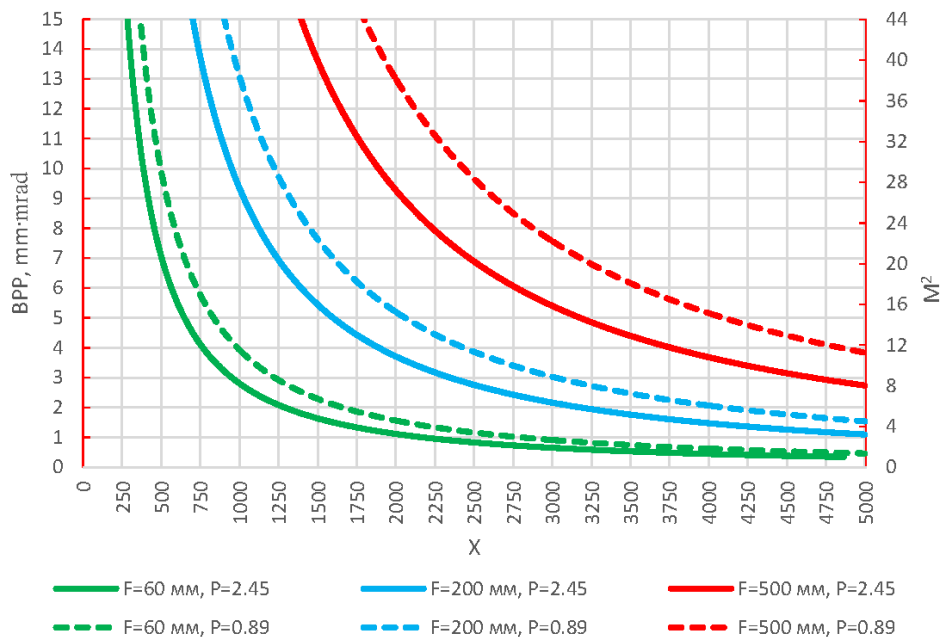


Рис. 2. Номограмма для определения фокусного расстояния оптического тракта

Данная номограмма построена для значений $P = 2,45$ и $0,89$. Область значений параметра X выбрана таким образом, чтобы перекрыть все комбинации F_k [9] и d_v [10]. Область значений параметров BPP и M^2 выбрана в соответствии с [10]. Зная параметры X и BPP или M^2 , легко определить с каким фокусным расстоянием из представленных будет получен минимальный диаметр пятна.

Выводы. Получена формула для определения диаметра сфокусированного пучка лазерного излучения. Получено аналитическое выражение для определе-

ния значения оптимального фокуса. Представленная номограмма позволяет выбрать наиболее оптимальное фокусное расстояние объектива, при известных параметрах качества излучения BPP или M^2 , диаметра волокна и фокусного расстояния коллиматора.

Литература

- [1] Богданов А.В. Особенности оценки технологических возможностей промышленных лазеров. *Технология машиностроения*, 2011, № 11, с. 34–36.
- [2] Григорьянц А.Г., Фромм В.А. Оптимизация характеристик сфокусированного лазерного луча для сварки. *Препринт НИЦТЛ*, 1984, № 5, с. 56–65.
- [3] Григорьянц А.Г., Васильцов В.В. Пространственная структура излучения мощных волноводных лазеров для технологий. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, спец. вып. № 5, с. 3–33.
- [4] Vasil'tsov V.V., Galushkin M.G., Dubrov V.D., Egorov E.N., Panchenko V.Ya., Soloviev A.V. Spatial structure of focused beams in high-power fiber and CO₂ lasers and peculiarities of their application in cutting. *Laser Physics*, 2016, vol. 26, no. 5, art. 055102.
- [5] Богданов А.В., Голубенко Ю.В. *Волоконные технологические лазеры и их применение*. Санкт-Петербург, Лань, 2016, 208 с.
- [6] Ширанков А.Ф., Носов П.А., Пахомов И.И., Григорьянц А.Г., Якунин В.П., Третьяков Р.С. Разработка лазерно-оптических систем технологических установок на основе теории лазерной оптики. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 9. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/926.html>.
- [7] Nosov P.A., Shirankov A.F., Grigoryants A.G., Tret'yakov R.S. Investigation of the spatial structure of a high-power fiber laser beam. *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, vol. 584, conf. 1, art. 012006.
- [8] Focusing units. URL: <http://www.optoskand.se/products/external-optics/focusing-units> (дата обращения 20.05.2018).
- [9] Collimating units. URL: <http://www.optoskand.se/products/external-optics/collimating-units/> (дата обращения 20.05.2018).
- [10] Лазеры. URL: <https://www.ipgphotonics.com/ru/products/lasers> (дата обращения 20.05.2018).

Вагин Дмитрий Владимирович — студент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Симонов Алексей Павлович — студент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Богданов Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Голубенко Юрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**ENGINEERING APPROACH TO THE COMPUTATION
OF THE FOCUSING SYSTEM OF FIBER-OPTICS LASER**

D.V. Vagin

dmitryvagin@mail.ru

SPIN-code: 4863-5126

A.P. Simonov

cimonovleshka@yandex.ru

SPIN-code: 7469-8023

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article investigates the problem of adapting the methods of computing the diameter of the focused laser emission beam in case of the known laser beam divergence in order to calculate the optical path of fiber-optics laser. We have obtained the dependency of the focused laser emission beam diameter in case of the known quality parameters of laser emission BPP and M2, which are extensively used for describing the parameters of today's fiber-optics lasers. The authors find out an analytic expression for evaluating the optimal focal distance. A nomogram for determining the focal length of the fiber-optics laser optical path under various values of lens aberration characteristics is introduced. We have developed a technique for finding the optimal focal distance of the fiber-optics lasers optical system under known parameters of laser emission and the collimator lens.

Keywords

Fiber-optics laser, laser optical system, laser beam distortion, quality of laser emission, optimal focal distance, laser emission beam diameter

Received 24.05.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Bogdanov A.V. Manufacturing capability assessment features of industrial lasers. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2011, no. 11, pp. 34–36.
- [2] Grigor'yants A.G., Fromm V.A. Optimization of focused laser beam characteristics for welding. *PREPRINT NITsTL*, 1984, no. 5, pp. 56–65.
- [3] Grigor'yants A.G., Vasil'tsov V.V. Radiation spatial structure of high-power waveguide and fiber lasers for technology. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2012, spec. iss. no. 5, pp. 3–33.
- [4] Vasil'tsov V.V., Galushkin M.G., Dubrov V.D., Egorov E.N., Panchenko V.Ya., Soloviev A.V. Spatial structure of focused beams in high-power fiber and CO₂ lasers and peculiarities of their application in cutting. *Laser Physics*, 2016, vol. 26, no. 5, art. 055102.
- [5] Bogdanov A.V., Golubenko Yu.V. Volokonnnye tekhnologicheskie lazery i ikh primeneniye [Fiber industrial lasers and their application]. Sankt-Peterburg, Lan' publ., 2016, 208 p.
- [6] Shirankov A.F., Nosov P.A., Pakhomov I.I., Grigor'yants A.G., Yakunin V.P., Tret'yakov R.S. Elaboration of laser optical systems of technological installations on the base of the laser optics theory. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 9. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/926.html>.

- [7] Nosov P.A., Shirankov A.F., Grigoryants A.G., Tret'yakov R.S. Investigation of the spatial structure of a high-power fiber laser beam. *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, vol. 584, conf. 1, art. 012006.
- [8] Focusing units. Available at: <http://www.optoskand.se/products/external-optics/focusing-units> (accessed 20 May 2018).
- [9] Collimating units. Available at: <http://www.optoskand.se/products/external-optics/collimating-units/> (accessed 20 May 2018).
- [10] [Lazery] Lasers. Available at: <https://www.ipgphotonics.com/ru/products/lasers> (accessed 20 May 2018).

Vagin D.V. — student, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Simonov A.P. — student, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — A.V. Bogdanov, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Yu.V. Golubenko, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.