



ФОРМИРОВАТЕЛИ ПРОФИЛЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ

А. В. Ласкин¹, В. Б. Ромашова²⁻³, С. А. Болт⁴,
Н. В. Буров⁴

¹AdlOptica GmbH, alex@adloptica.com, Berlin, Германия;

²Россия, АО "Ленинградские Лазерные Системы", vr@lenlasers.ru,

³Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, vasyokjk@gmail.com,

⁴ООО "ОЭС Спецпоставка", s.bolt@oessp.ru, n.burov@oessp.ru, Санкт-Петербург, Россия

Правда ли, что действие лазерного луча эффективно? Если нет, то каким образом можно изменить профиль интенсивности луча для оптимизации технологического процесса? Эти вопросы имеют большое значение для различных промышленных лазерных технологий, особенно для таких применений, как лазерная маркировка и гравировка. Часто эффективность конкретной технологии может быть существенно улучшена за счет преобразования распределения интенсивности лазерного луча. Это одна из причин растущего интереса к методам формирования излучения.

ВВЕДЕНИЕ

Неоднородность лазерного излучения может быть источником трудностей при применении лазеров, например, в так называемой зоне термического воздействия (HAZ – heat-affected zone) в сварных или конусообразных отверстиях [1].

Это утверждение можно проиллюстрировать, если мы рассмотрим геометрические свойства профиля интенсивности одномодового (или TEM_{00}) лазерного луча. Такой луч часто используется в различных технологиях обработки материалов, поскольку он обеспечивает наибольшую концентрацию энергии. Конечно, каждое лазерное приложение имеет свои особенности взаимодействия материала и лазерного излучения, однако существует одно общее свойство всех одномодовых лазеров – гауссова функция распределения интенсивности. Поэтому

LASER BEAM INTENSITY PROFILE SHAPERS

A. V. Laskin¹, V. B. Romashova²⁻³, S. A. Bolt⁴,
N. V. Burov⁴,

¹AdlOptica GmbH, alex@adloptica.com, Berlin, Germany;

²AO "Leningrad Laser Systems", vr@lenlasers.ru,

³Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, vasyokjk@gmail.com,

⁴LLC "OES Spetspostavka", s.bolt@oessp.ru, n.burov@oessp.ru, St. Petersburg, Russia

Is it true that the laser beam action is effective? If not, how it is possible to change the beam intensity profile in order to optimize process characteristics? These issues are of great importance for various industrial laser technologies, especially for applications such as laser marking and engraving. It often happens that the effectiveness of a particular technology can be significantly improved by converting the intensity distribution of the laser beam. This is one of the reasons for the growing interest in the methods of radiation formation.

INTRODUCTION

The inhomogeneity of laser radiation can be a source of difficulty in the use of lasers, for example, in the so-called heat-affected zone (HAZ) in welded or cone-shaped holes [1].

This statement can be illustrated if we consider geometric properties of the single-mode (or TEM_{00}) laser beam intensity profile. Such beam is often used in a variety of materials processing technology, since it provides the greatest energy concentration. Of course, each laser application has its own peculiarities of interaction of material and laser radiation, however there is one feature common to all single-mode lasers – intensity distribution Gaussian function. Therefore, in order to evaluate the efficiency of a laser beam, it is possible to consider only the geometric features of the Gaussian function as a first step without taking into account such effects as combustion, melting, laser torch, etc. accompanying laser processing.



тому для оценки эффективности лазерного луча в качестве первого шага можно рассмотреть только геометрические особенности функции Гаусса без учета таких эффектов, сопровождающих лазерную обработку, как горение, плавление, лазерный факел т. д.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Распределение интенсивности $I(r)$ однодомового лазерного пучка [2, 3] описывается в полярных координатах хорошо известным соотношением:

$$I(r) = I_{\max} e^{-\frac{r^2}{\omega_0^2}} = \frac{2}{\pi \omega_0^2} e^{-\frac{r^2}{\omega_0^2}}, \quad (1)$$

где r – радиус луча, ω_0 – радиус перетяжки, I_{\max} – максимальное значение интенсивности. Значение I_{\max} выбрано таким образом, что полная энергия пучка, соответствующая объему фигуры под поверхностью двумерной гауссовой функции $I(r)$, равна условной единице (рис. 1).

Цель большинства лазерных технологий – передать определенное количество энергии лазера обрабатываемому материалу, поэтому для анализа эффективности логично использовать оценку энергии различных частей лазерного луча. Для удобства дальнейшего рассмотрения принято, что все процессы распространения лазерного излучения происходят с интервалом времени, равным единице. Количество энергии E_{r1-r2} , сосредоточенное в кольцевой части лазерного луча, ограниченное кругами радиусов r_1 и r_2 , можно найти путем интегрирования функции интенсивности $I(r)$

$$E_{r1-r2} = 2\pi \int_{r_1}^{r_2} I(r) r dr. \quad (2)$$

Подстановка функции распределения интенсивности (1) в формулу (2) и интегрирование приводят к формуле:

$$E_{r1-r2} = e^{-\frac{r_1^2}{\omega_0^2}} - e^{-\frac{r_2^2}{\omega_0^2}}. \quad (3)$$

Предположим, что технологии обработки материалов происходят при применении интенсивности пучка на определенном уровне I_h (см. рис.1). Для удобства дальнейших рассуждений введем переменную: $h = I_h / I_{\max}$.

THEORETICAL JUSTIFICATION

The intensity distribution $I(r)$ of single-mode laser beam [2, 3] is described in polar coordinates by the well-known relation:

$$I(r) = I_{\max} e^{-\frac{r^2}{\omega_0^2}} = \frac{2}{\pi \omega_0^2} e^{-\frac{r^2}{\omega_0^2}}, \quad (1)$$

where r is beam radius, ω_0 is the constriction radius, I_{\max} is the maximum intensity value. I_{\max} value is selected so that the total beam energy corresponding to figure volume under the surface of the two-dimensional Gaussian function $I(r)$ is equal to a conventional unit (Fig.1).

The goal of most laser technologies is to transfer a certain amount of laser energy to the material being processed, thus, it is logical to use the energy estimate of different parts of the laser beam to analyze the efficiency. For convenience of further consideration, let's assume that all the processes of laser radiation propagation occur with a time interval equal to one. Amount of energy E_{r1-r2} , concentrated in the annular part of the laser beam, bounded by circles of radii r_1 and r_2 , can be found by integrating the intensity function $I(r)$

$$E_{r1-r2} = 2\pi \int_{r_1}^{r_2} I(r) r dr. \quad (2)$$

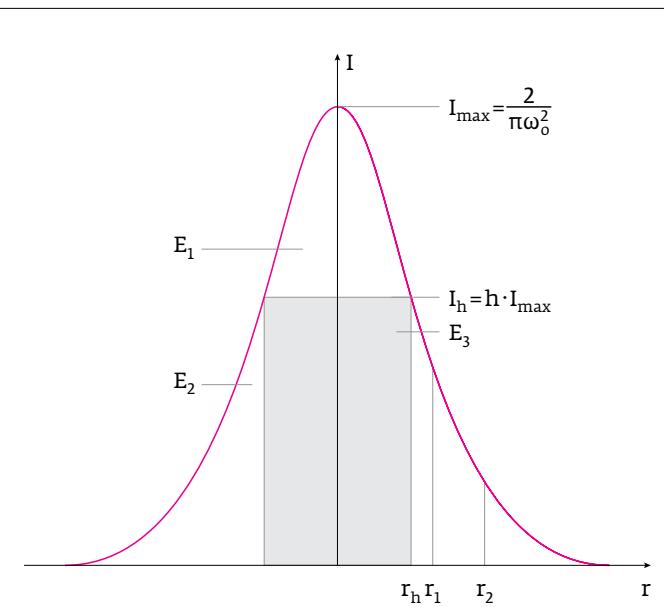


Рис. 1. Гауссовое распределение интенсивности однодомового лазерного пучка

Fig. 1. Gaussian intensity distribution of a single-mode laser beam

Таким образом, h является "рабочим" уровнем лазерного луча, при этом диапазон значений h составляет значения от 0 до 1.

Теперь рассмотрим трехмерную геометрическую фигуру, ограниченную горизонтальной плоскостью и поверхностью двумерной гауссовой функции $I(r)$, определенной в полярных координатах. Объем этой фигуры имеет физический смысл энергии лазерного луча; для принятой ранее нормировки значение этой энергии равно единице. Обозначим через переменные E_1 , E_2 и E_3 разные части фигуры, которые могут быть интерпретированы как части энергии пучка:

- E_1 – "вершина" функции Гаусса, где интенсивность превышает рабочий уровень h (очевидно, что эта энергия используется неэффективно и в некоторых случаях представляет собой прямую потерю, например, при абляции тонких пленок материала);
- E_2 – "хвосты" функции Гаусса, где интенсивность недостаточна для технологического процесса, но чаще всего является причиной образования НАЗ (таким образом, этот случай практически всегда соответствует потере или неэффективному использованию лазерной энергии);
- E_3 – эффективный "цилиндр" энергии (лазерный пучок "работает" с оптимальной интенсивностью).

Используя соотношение (3), нетрудно определить формулы для вычисления значений "частей энергии":

$$\begin{aligned} E_1 &= 1 - h + \ln h \cdot h \\ E_2 &= h \\ E_3 &= -\ln h \cdot h \\ E_1 + E_2 &= 1 + \ln h \cdot h. \end{aligned} \quad (4)$$

Сумма $E_1 + E_2$ приведена для оценки потерь при обработке тонких пленок или покрытий. Результаты расчетов по формулам (4) представлены на рис. 2.

Эти результаты весьма интересны. Безусловная потеря энергии E_2 может достигать очень высоких величин. Например, в случае, если рабочий уровень энергии составляет половину от максимума (часто этот уровень считается рабочим), то потери энергии составляют 50% от полной энергии лазерного луча. В условиях лазерной обработки тонких пленок энергети-

Permutation of intensity distribution function (1) into formula (2) and integrating lead to the following formula:

$$E_{r1-r2} = e^{-\frac{2r_1^2}{\omega_0^2}} - e^{-\frac{2r_2^2}{\omega_0^2}} \quad (3)$$

Suppose that the technologies for materials processing occur when the intensity of the beam is applied at a certain level I_h (see Fig.1). For convenience of further consideration, let's introduce the variable: $h = I_h / I_{max}$. Thus, h is the "working" level of the laser beam, wherein the range of h values is a value between 0 and 1.

Now, let's consider a three-dimensional geometric figure limited by a horizontal plane and the surface of a two-dimensional Gaussian function $I(r)$ defined in polar coordinates. The volume of this figure has physical sense of the laser beam energy; for the normalization adopted earlier, the value of this energy is equal to one. Let the variables E_1 , E_2 and E_3 denote different parts of the figure that can be interpreted as parts of the beam energy:

- E_1 is the "apex" of the Gaussian function, where the intensity exceeds the working level h (obviously that this energy is used inefficiently and, in some cases, represents a direct loss, e.g., in the ablation of thin films of material);

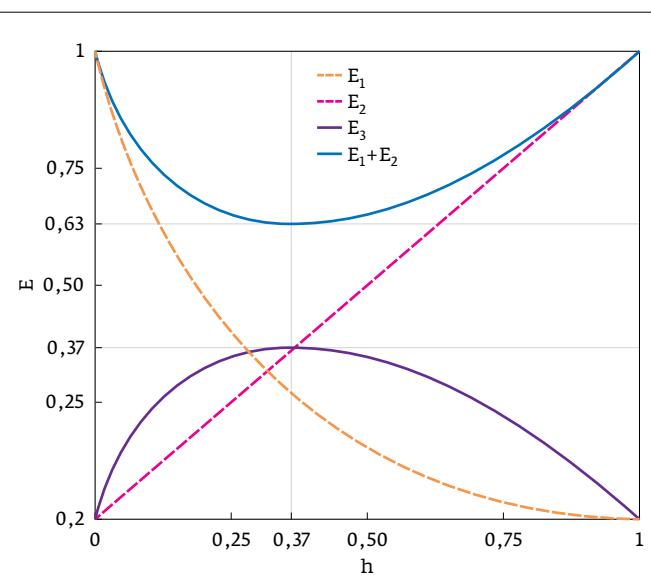


Рис. 2. Графики функций частей энергии лазерного луча: E_1 – "вершина", E_2 – "хвосты", E_3 – "эффективный цилиндр"
Fig. 2. Graphs of functions of the parts of the energy of the laser beam: E_1 – "apex", E_2 – "tails", E_3 – "effective cylinder"

ческая часть E_1 , вершина Гаусса, также рассматривается как потеря энергии, поскольку эта часть превышает рабочий уровень энергии I_h . Таким образом, обе энергетические части E_1 и E_2 являются потерями. Их сумма E_1+E_2 также показана на диаграмме; минимум этой функции 0,63. Другими словами, при обработке тонких пленок в лучшем случае "только" 63% энергии теряется или неэффективно используется, а 37% "работают".

Это только геометрическая интерпретация. Однако такой подход позволяет получить представление о масштабе потерь лазерного излучения, которые могут иногда достигать половины полной энергии пучка!

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПРОФИЛЕЙ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ

Несомненно, преобразование исходной гауссовой формы профиля в эффективный цилиндр с равномерной интенсивностью, помогло бы эффективно использовать энергию лазера и улучшить технологии, где наиболее желательна однородная интенсивность. Для реализации такого преобразования предлагается несколько типов оптических систем, называемых также шейперами (от английского beam shaper) [4]: преломляющие, дифракционные, интеграторы пучков или комбинированные системы. Выбор подходящего решения зависит от уровня мощности, длины волны, качества гомогенизации пучка и других особенностей конкретной задачи.

Преобразование гауссового пучка в пучок с равномерной интенсивностью (flat-top или top hat) является основной функцией πShaper, рефракционного семейства систем преобразования излучения, предназначенных для работы с популярными в науке и промышленности лазерами УФ-, ИК- и видимого диапазонов.

Концепция работы πShaper проиллюстрирована на рисунке 3. Гауссовое распределение интенсивности коллимированного пучка ТЕМ₀₀-лазера преобразуется в плоское распределение на вершине (похожее на греческую букву π). Выходной пучок также коллиминирован и имеет приблизительно те же размеры, что и входной пучок.

πShaper представляет собой телескоп, где сохраняется целостность пучка, профиль интенсивности трансформируется контролируемым образом с помощью линз с гладкими оптическими поверхностями, а одним

- E_2 are the "tails" of the Gaussian function where intensity is insufficient for the process, but most often is the cause of HAZ formation (thus, it is almost always the case that corresponds to loss or inefficient use of laser energy);
- E_3 is the effective "cylinder" of energy (laser beam "works" with the optimal intensity).

Using equation (3), it is easy to determine the formulas for calculating the values of the "parts of energy":

$$\begin{aligned} E_1 &= 1 - h + \ln h \cdot h \\ E_2 &= h \\ E_3 &= -\ln h \cdot h \\ E_1 + E_2 &= 1 + \ln h \cdot h. \end{aligned} \quad (4)$$

Sum of E_1+E_2 is given for the evaluation of losses in the processing of thin films or coatings. The results of calculations using formulas (4) are shown in Fig. 2

These results are very interesting. Unconditional loss of energy E_2 can reach very high values. For example, if the working level of energy is half of the maximum (this level is often considered a working one), the energy loss is 50% of the total energy of the laser beam. In the conditions of laser processing of thin films, the energy part E_1 , the Gauss apex, is also considered as energy loss since this part exceeds the energy working level I_h . Thus, both energy parts E_1 and E_2 are losses. Their sum E_1+E_2 is also shown in the diagram; the minimum of this function is 0.63. In other words, when processing thin films "only" 63% of energy is lost or inefficiently used, and 37% "work" at the best the case.

This is only a geometric interpretation. However, this approach provides an idea of the scale of

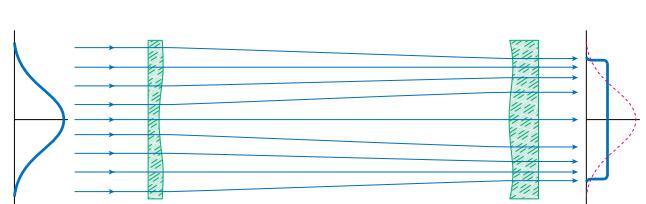


Рис. 3. πShaper преобразует гауссовый пучок в пучок равномерной интенсивности

Fig. 3. πShaper transforms a Gaussian beam into uniform intensity beam

из основных принципов является отсутствие волновой aberrации, что гарантирует сохранение плоскостности волнового фронта выходного пучка. Эти особенности отличают πShaper от гомогенизаторов интеграционного типа (homogenizers), где однородная интенсивность обеспечивается применением многолинзовых оптических компонентов, разбиением исходного пучка на части и "перемешиванием" этих частей в определенной рабочей плоскости. В отличие от интегрирующих гомогенизаторов, плоскость выходного волнового фронта πShaper'a обеспечивает большее расстояние после устройства, где свойства пучка остаются стабильными. Эта функция упрощает применение πShaper'ов в реальных системах.

Построенный по схеме телескопа Галилея πShaper реализуют преобразование лазерных пучков без внутренней фокусировки, что важно в случае приложений с мощными и короткоимпульсными лазерами. Теоретически преобразование излучения πShaper'ом происходит без потерь, а применение оптимизированных просветляющих покрытий, позволяет достичь почти 100%-го пропускания системы – большое преимущество перед гомогенизаторами дифракционного типа.

На рис. 4 представлен пример преобразования гауссового пучка в равномерный (flat-top) пучок πShaper'ом.

Интересной особенностью является тот факт, что одно устройство может формировать несколько выходных профилей в зависимости от входного диаметра пучка.

Благодаря этому системы формирования равномерных пучков πShaper находят применение в качестве полезных инструментов для улучшения промышленных лазерных технологий и решения некоторых научных задач. Примером успешного применения является лазерная абляция кремния компанией Ekspla Ltd. (рис. 5). Здесь отверстие выполнено в крем-

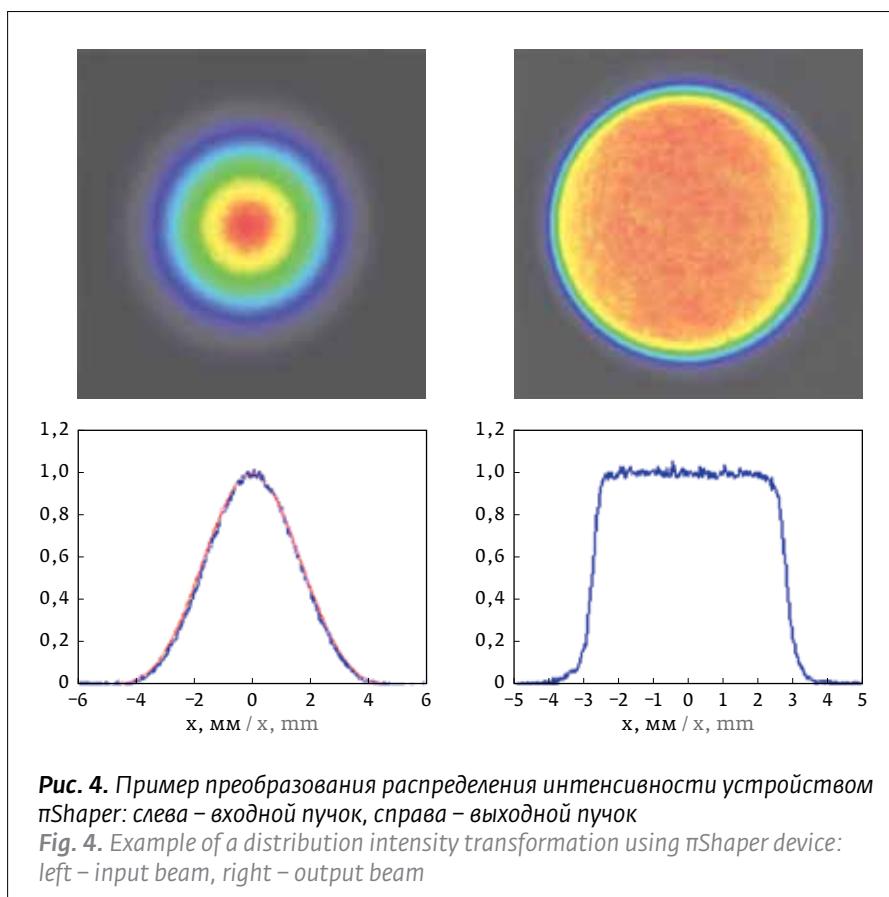


Рис. 4. Пример преобразования распределения интенсивности устройством πShaper: слева – входной пучок, справа – выходной пучок

Fig. 4. Example of a distribution intensity transformation using πShaper device: left – input beam, right – output beam

losses of laser radiation, which can sometimes reach half the total beam energy!

LASER BEAM PROFILE TRANSFORMATION

Undoubtedly, the transformation of the initial Gaussian profile shape into an effective cylinder with uniform intensity would help to efficiently use the laser energy and improve the technologies where homogeneous intensity is most desirable. To implement this transformation, several types of



Рис. 5. Глухие отверстия, выполненные в кремнии с помощью TEM_{00} Nd:YAG-лазера: слева – гауссовый пучок, в центре и справа – пучок, полученный с помощью πShaper'a

Fig. 5. Blind holes, formed in silicon using TEM_{00} Nd:YAG laser: left – Gaussian beam, in center and on right – using πShaper



ния с помощью наносекундного лазера Ekspla DPSS Nd: YAG с использованием πShaper. Задача состояла в том, чтобы достичь профиля "плоского дна" глухих переходных отверстий без дефектов на краях – это важно при изготовлении многослойных печатных плат.

Разница в результатах очевидна: при использовании гауссова луча форма отверстия повторяет гауссовый профиль, т. е. сужается к центру (см.рис. 5, слева), так как почти вся энергия сосредоточена в центре и лишь ее малая часть на периферии отверстия. Высокая интенсивность в центре гауссова пучка может превышать порог абляции слоя меди под ним.

Форма отверстия резко изменяется при использовании πShaper. Отверстия, образованные с помощью плоского распределения интенсивности, имеют четкие края и плоское дно (см. рис.5, центр и справа). Форма "плоского дна" отверстий устойчива в широком диапазоне смещений от изображения (фокальной) плоскости. Таким образом, применение πShaper помогло решить задачу сверления отверстий необходимой формы.

Формирование профиля пучка открывает новые возможности для улучшения производительности тех лазерных технологий, где наиболее желательна равномерная интенсивность. И πShaper позволяет достичь оптимального результата при решении разнообразных индустриальных и научных задач легко и просто.

В практике лазерных технологий применяются два модельных ряда преобразователей лазерного излучения:

- πShaper для формирования коллимированных пучков равномерной интенсивности и
- Focal-πShaper для сфокусированных пучков и создания равномерных или кольцевых профилей пятен в фокальной плоскости фокусирующего объектива.

πShaper

πShaper преобразует лазерные пучки с гауссовым или подобным распределением интенсивности в пучки равномерной интенсивности и с плоским волновым фронтом (рис. 6). Преобра-

зительные системы предложены, также называемые shapers (beam shapers) [4]: рефрактивные, дифрактивные, пучковые интеграторы или комбинированные системы. Выбор подходящего решения зависит от уровня мощности, длины волны, качества равномерности пучка и других особенностей конкретного применения.

Преобразование Гауссова пучка в пучок с равномерной интенсивностью (flat-top or top hat) является основной функцией πShaper, рефрактивной семьей систем трансформации излучения, предназначенной для работы с УФ, ИК, видимым диапазоном лазеров, распространенных в науке и промышленности.

Схема принципа действия πShaper представлена на рис. 3. Коллиминированный пучок TEM₀₀ лазера имеет Гауссовую интенсивность, которая преобразуется в равномерную на выходе πShaper. Выходной пучок также коллиминирован и имеет приблизительно те же размеры, что и входной.

πShaper – это телескоп, сохраняющий целостность пучка, в то время как профиль интенсивности преобразуется в контролируемый способом методом линз с гладкими оптическими поверхностями, и одна из основных принципов – отсутствие волновых aberrаций, что гарантирует сохранение плоскости фронта волны выходного пучка. Эти особенности отличают πShaper от интегрирующих homogenizers, где равномерная интенсивность обеспечивается за счет использования многолинзовых оптических компонентов, разбивающих исходный пучок на части и "перемешивающих" эти части в определенной рабочей плоскости. В отличие от интегрирующих homogenizers, плоскость фронта волны πShaper после устройства остается стабильной на значительном расстоянии, где свойства пучка остаются стабильными. Это делает использование πShaper в реальных системах проще.

Составленный по схеме Галилеев телескоп, πShaper реализует трансформацию





зование такого типа важно в разнообразных приложениях [5]:

- голография,
- интерферометрия,
- оптические системы современных конфокальных микроскопов и микроскопов реализующих различные флюоресцентные технологии,
- оптические системы мощных лазеров, построенные по схеме генератор-усилитель (MOPA-lasers), где управление профилем интенсивности позволяет существенно повысить эффективность и стабильность усиления,
- сварка,
- наплавка,
- лазерная закалка.

Некоторые модели πShaper'ов имеют ахроматическую конструкцию, которая позволяет использовать одно и то же устройство с различными лазерными источниками одновременно и обеспечивать с одинаковой эффективностью преобразование профиля интенсивности на разных длинах волн.

Основные свойства систем πShaper:

- линзовье оптические системы преобразования распределения интенсивности лазерных пучков из гауссова в равномерное (flat-top);
- принцип преобразования – контролируемое изменение волнового фронта внутри устройства – 1-й компонент вносит сферическую aberrацию, необходимую для трансформации профиля интенсивности, 2-й компонент компенсирует эту aberrацию,
- плоский волновой фронт выходного пучка, т. е. без aberrационный,
- работа с TEM_{00} лазерами, а также с многомодовыми лазерами, распределение интенсивности которых подобно гауссовому, например, параболическое,
- коллимированный выходной пучок, расходимость как у входного гауссова пучка,
- стабильность выходного профиля на большом расстоянии,
- ахроматический дизайн – способность работать с несколькими лазерами одновременно с одинаковой эффективностью преобразования на разных длинах волн,
- отсутствие внутренней фокусировки.

laser beams without internal focusing, which is important in the case of applications with powerful and short-pulse lasers. Theoretically, the radiation transformation by πShaper occurs without losses and application of optimized antireflective coatings allows to achieve almost 100% system transmittance – a great advantage over homogenizers diffraction type.

Fig. 4 shows an example of converting a Gaussian beam into a uniform (flat-top) beam using πShaper.

An interesting feature is the fact that one device can form several output profiles depending on the input beam diameter.

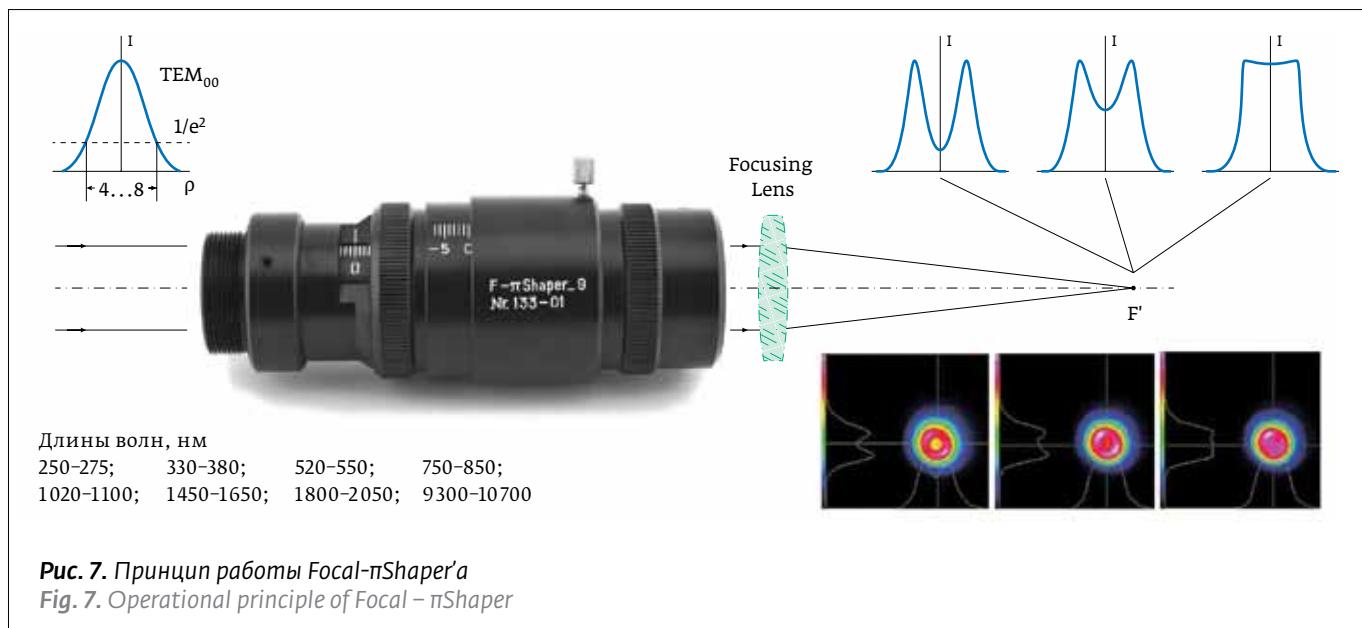
Due to this, the πShaper systems of uniform beam formation are applied as useful tools for improving industrial laser technologies and solving some scientific problems. An example of a successful application is the laser ablation of silicon by Ekspla Ltd. (Fig. 5). Here, the hole is made in silicon using a nanosecond laser Ekspla DPSS Nd: YAG using πShaper. The aim was to achieve the "flat bottom" profile of the blind by-pass hole without edge defects – it is important to at manufacture of multi-layer printed circuit boards.

The difference in the results is obvious: if a Gaussian beam is used, the hole shape follows the Gaussian profile, i.e. narrows towards the center (see Fig. 5, left), since almost all the energy is concentrated at the center, and only a small part of it – on the periphery of the hole. The high intensity in the center of the Gaussian beam can exceed the ablation threshold of the copper layer below it.

The shape of the hole changes abruptly when using πShaper. The holes formed through the flat intensity distribution, have clearly edges and flat bottom (see Fig. 5, center and right). The shape of the "flat bottom" of the holes is stable in a wide range of displacements from the image (focal plane). Thus, the use of πShaper helped solve the problem of drilling holes of the required shape.

The formation of the beam profile opens up new possibilities for improving the performance of those laser technologies where the uniform intensity is the most desirable. Moreover, πShaper allows to achieve the optimum result when solving various industrial and scientific tasks in an easy and simple way.

In the practice of laser technologies, two models of laser radiation transformers are used:



Focal- π Shaper

Focal- π Shaper (рис. 7) работает с одномодовыми лазерами и предназначен для формирования коллимированного пучка с распределением интенсивности в виде функции "диск Эйри", который при фокусировке линзой преобразуется в пятно с равномерным или кольцевым распределением интенсивности вблизи фокуса [6]. Преобразователи Focal- π Shaper могут применяться с любой фокусирующей оптической системы, например, со сканаторами с F-Θ объективом или объективами микроскопа; единственное условие – фокусирующая система должна иметь дифракционно-ограниченный уровень фокусировки, что обеспечено в современных объективах. Поскольку Focal- π Shaper оптимизируют условия интерференции при фокусировке лазерных пучков, и результирующие рабочие пятна имеют малый размер, обычно менее 100 мкм, главные области применения этих преобразователей связаны с микропрограммой материалов.

Основные приложения Focal- π Shaper:

- 3D-печать (Селективное лазерное плавление),
- лазерный нагрев в геофизических исследованиях,
- маркировка и гравировка,
- скрайбирование,
- сверление, включая глухие отверстия в печатных платах,
- запись изображений в полиграфии и электронике,

- π Shaper for the formation of collimated beams of uniform intensity, and
- Focal- π Shaper for focused beams and creating uniform or annular spot profiles in the focal plane of the focusing lens.

π Shaper

π Shaper transforms laser beams with Gaussian or similar intensity distribution in the beam of uniform intensity and with a plane wave front (Fig. 6). Transformation of this type is important in a variety of applications [5]:

- holography,
- interferometry,
- optical systems of modern confocal microscopes and the microscopes implementing various fluorescent technologies,
- optical systems of power lasers built according to the oscillator-amplifier scheme (MOPA-lasers), where the intensity profile control allows to significantly increase the effectiveness and stability of amplification,
- welding,
- surfacing,
- laser hardening.

Some π Shaper models have achromatic design, which allows using the same device with different laser sources simultaneously and providing with the same efficiency the transformation of the intensity profile at different wavelengths.

- микросварка,
- микрообработка материалов,
- масс-спектрометрия,
- любое лазерное приложение, где необходимо сосредоточить излучение в фокусе, обеспечив равномерное или кольцевое распределение интенсивности.

Основные свойства систем Focal- π Shaper:

- афокальная линзовая оптическая система с гладкими оптическими поверхностями,
- без внутренней фокусировки,
- входной пучок:
 - коллимированный или слабо расходящийся,
 - TEM_{00} ,
- выходной пучок:
 - коллимированный или слабо расходящийся,
 - "диск Эйри" - оптимизирован для последующей фокусировки в пятно равномерной интенсивности,
- профили при фокусировке: равномерный (flat-top), кольцо, "перевернутый Гаусс",
- спектральные диапазоны: УФ, видимый, ИК, CO_2 лазеры,
- глубина фокуса сравнима с гауссовыми пучками,
- работа с любой фокусирующей оптикой дифракционного уровня,
- работа со сканаторами,
- простота юстировки и интеграции в уже существующем оборудовании,
- компактность.

ПРИМЕНЕНИЕ ШЕЙПЕРОВ В 3D-ПЕЧАТИ

В последнее время активно развивается технология селективного лазерного плавления (СЛП), при которой послойное формирование изделия реализовано путем плавления металлического порошка с помощью сфокусированного излучения одномодовых (TEM_{00}) лазеров. Эта технология, называемая по-английски SLM (Selective Laser Melting), применяется в 3D принтерах для производства сложных структур и агрегатов или неразборных конструкций со сложной геометрией. Среди других ее важных достоинств [7]:

- возможность формирования деталей с внутренними отверстиями,
- эффективное расходование материала (более 95% незадействованного порошка можно использовать в следующем цикле производства),

The main properties of π Shaper systems:

- innovative optical system for transforming the intensity distribution of laser beams from Gaussian to uniform (flat-top);
- principle of transformation is a controlled change in the wave front within the device - the 1st component introduces the spherical aberration required for the transformation of the intensity profile, the 2nd component compensates for this aberration,
- plane wave front of the output beam, i.e. abrasion-free,
- operation with TEM_{00} lasers, as well as with multimode lasers, where the intensity distribution is similar to Gaussian, e.g., parabolic,
- collimated output beam, with divergence similar to the input Gaussian beam,
- stability of the output profile at a great distance,
- achromatic design, i.e. the ability to operate multiple lasers simultaneously with the same transformation efficiency at different wavelengths,
- absence of internal focusing.

Focal- π Shaper

Focal- π Shaper (Fig. 7) operates with single-mode lasers and is designed to form a collimated beam with intensity distribution as a function of the "Airy disk", which, when focused by a lens, is transformed into a spot with a uniform or circular intensity distribution near the focus [6]. Focal- π Shaper transformers can be used with any of the



Рис. 8. Пример процесса записи изображения в технологии СЛП

Fig. 8. Example the image recording process using SLM technology

- ускорение производства прототипов,
- возможность автоматизации производственного процесса.

Технология СЛП (рис. 8) является термическим процессом, поэтому чрезвычайно важен контроль над тепловыми эффектами как в зоне расплава порошка, так и в оптическом тракте оборудования 3D-печати[8]. Это особенно актуально сегодня, когда перед воспринятой промышленностью технологией ставится задача повышения производительности, что, в свою очередь, требует применения лазеров повышенной мощности. Необходимые для этого лазеры доступны, например, современные одномодовые волоконные лазеры, мощность которых достигает нескольких киловатт. Однако одним из серьезных препятствий их успешного применения является гауссовое распределение интенсивности, приводящее к таким проблемам, как неравномерное распределение температуры в зоне расплава и последующие неравномерность процесса плавления, нежелательное испарение или искрение.

Другая проблема связана с оптикой – гауссовое распределение интенсивности лазерного излучения приводит к неравномерному нагреву оптических компонентов, что вызывает термический сдвиг перетяжки сфокусированного лазерного пучка и волновые aberrации; в результате в рабочей плоскости 3D-принтера происходят изменения размера

focusing optical system, e. g., with scanners with F-Θ lens or microscope lenses; the only condition is that the focusing system must have diffraction-restricted level of focusing which is provided in the modern lenses. Since Focal- π Shaper optimizes interference condition when focusing laser beams, and the resulting working spots have a small size, typically less than 100 μm , the main scope of the transformers is associated with the micro-processing of materials.

Main Focal- π Shaper applications:

- 3D printing (selective laser melting),
- Laser heating in geophysical studies,
- Marking and engraving,
- Scribing,
- Drilling, including blind holes in printed circuit boards,
- Recording images in printing and electronics,
- Micro-welding,
- Micro-processing of materials,
- Mass-spectrometry,
- Any laser application where it is necessary to focus the radiation, ensuring a uniform or circular intensity distribution.

Main properties of Focal- π Shaper systems:

- Afocal lens optical system with smooth optical surfaces,
- Without internal focusing,
- Input beam:
 - Collimated or slightly divergent,
 - TEM_{00} ,
 - Output beam:
 - Collimated or slightly divergent,
 - "Airy disk", optimized for the subsequent focusing into a spot of uniform intensity,
 - Profiles of focusing: uniform (flat-top), ring, "inverted Gauss",
 - Spectral ranges: UV, visible, IR, CO_2 lasers,
 - Depth of focus is comparable with Gaussian beams,
 - Operation with any focusing optics of the diffraction level,
 - Operation with scanners,
 - Simple alignment and integration in existing equipment,
 - Compactness.

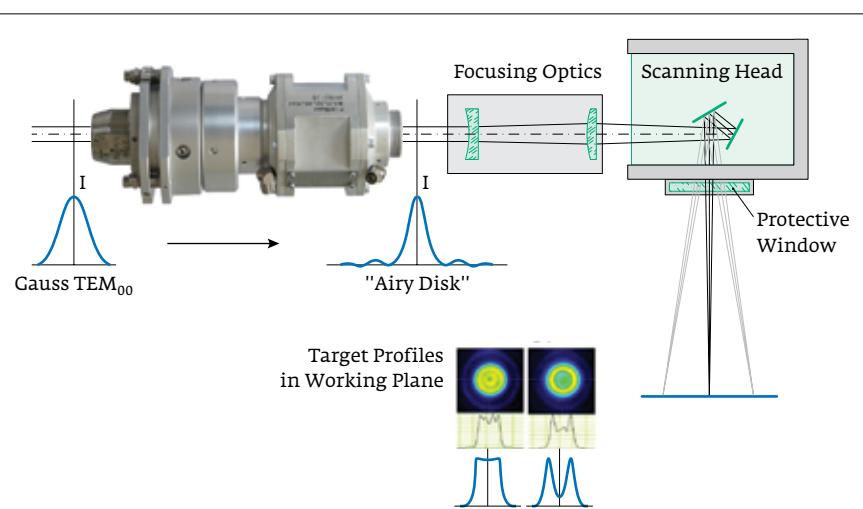


Рис. 9. Система СЛП, оснащенная Focal- π Shaper и свободным от термических эффектов защитным окном

Fig. 9. SLM system, equipped with Focal- π Shaper and a protective window free from thermal effects

и распределения интенсивности сфокусированного рабочего пятна. Эти термически индуцированные эффекты особенно сильно проявляются на защитных окнах рабочей камеры оборудования, так как окна неизбежно покрываются слоем порошка и пыли в процессе лазерной записи, усиливающими неравномерное нагревание материала окон. Существует решение этой проблемы в виде окон из специальных стекол, самокомпенсирующих термические эффекты, однако эта тема выходит за рамки настоящей статьи.

Для выравнивания температурного распределения в ванне расплава успешно применяются Focal- π Shaper, позволяющие управлять распределением интенсивности сфокусированного пятна, пример оптической системы 3D-принтера показан на рис. 9.

Одномодовое излучение из волоконного лазера преобразуется коллимирующим Focal- π Shaper в коллинированный пучок с распределением интенсивности диска Эйри и далее фокусируется объективом в рабочую плоскость, запись изображения реализуется с помощью сканера [3]. Образуемое в фокальной плоскости объектива пятно имеет равномерное распределение интенсивности (flat-top) или "бублик" (doughnut). В силу свойств нагрева теплопроводящих материалов именно "бублик" является оптимальным для технологии СЛП, поскольку обеспечивает равномерное распределение температуры и стабильность процесса.

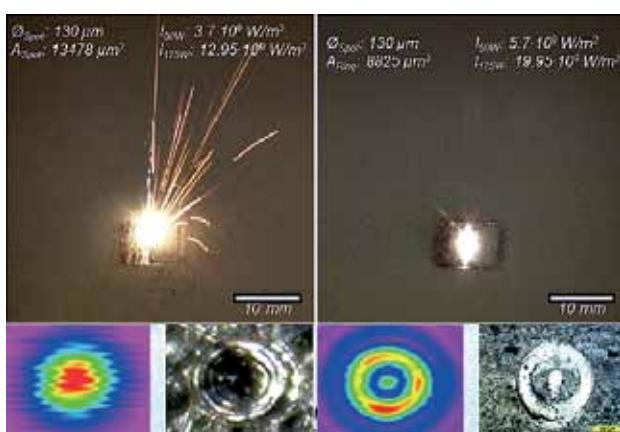


Рис. 10. Сравнение процессов СЛП записи: слева – гауссовый пучок, справа – "бублик"

Fig. 10. Comparison of SLM recording processes: left – Gaussian beam, right – "doughnut"

APPLICATION OF SHAPERS IN 3D PRINTING

Recently the technology of selective laser melting (SLM) has been developed actively where the product is layer-formed through the melting of metal powder using focused radiation single-mode (TEM_{00}) lasers. This technology, called SLM (Selective Laser Melting), is used in 3D printers for the production of complex structures and aggregates or integral structures with complex geometry. Its other important advantages [7] are:

- possibility to create details with internal holes,
- effective material consumption (more than 95% of unused powder can be used in the next cycle of production)
- accelerated prototypes production,
- possibility of automation of the production process.

SLM technology (Fig.8) is a thermal process, therefore it is extremely important to control the thermal effects, both in powder melt zone and in the optical path of the 3D-printing equipment [8]. This is especially true today, when the task of increasing productivity is put before the technology perceived by industry, which in turn requires the use of lasers of increased power. The necessary lasers are available, e.g., modern single-mode fiber lasers, whose power reaches several kilowatts. However, one of the serious obstacles to their successful application is Gaussian intensity distribution, resulting to such problems as uneven temperature distribution in the melt zone and subsequent non-uniformity of the melting process, undesirable evaporation or arcing.

Another problem is related to optics – the Gaussian distribution of the laser radiation intensity leads to an uneven heating of the optical components, which in turn causes a thermal shift of the constriction of focused laser beam and wave aberrations; as a result, in the working plane of the 3D-printer there are changes in the size and the intensity distribution from the focused working spot. These thermally induced effects are particularly pronounced on the protective windows of the equipment working chamber, since windows are inevitably covered with a layer of powder and dust in the laser recording process, which increase the uneven heating of the window material. There is a solution to this problem in



Представленная выше оптическая система применена в экспериментальной установке для испытаний СЛП технологии с различными распределениями интенсивности и различными защитными стеклами. Сравним процессы записи изображений, полученные с помощью гауссовых рабочих пятен и пятен с температурным распределением в виде "бублика" (рис. 10). Измерения распределений и результаты гравировки стальной пластины показаны в нижней части рисунка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные примеры позволяют сделать следующие выводы:

- существенно меньше количества искр в случае использования "бублика" подтверждает целесообразность обеспечения равномерной температуры в зоне расплава порошка;
- распределение интенсивности "бублик" позволяет повысить эффективность использования лазерной энергии и производительность процесса;
- исследование изготовленных деталей показало меньшую пористость при записи пятном в виде "бублика".

В целом, исследования СЛП-процесса и измерения реальных изготовленных деталей подтвердили правильность предлагаемого подхода по управлению распределением интенсивности сфокусированного лазерного пятна и применению защитных окон из специальных стекол для повышения производительности и стабилизации технологического процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Laskin A. V. How effective is using of laser beam? – www.mt-berlin.com
2. Борн М., Вольф Е. Принципы оптики, Изд. 2-е, Пер. с англ. – Главная редакция физико-математической литературы изд-ва "Наука", 1973.
3. Laskin A. V., Bae H., Laskin V. V., Ostrun A. Beam shaping of focused beams for microprocessing applications. –Conference paper, icaleo2014, Paper P136.
4. Dickey F. M. Laser Beam Shaping. – Optics and Photonics News, 30–35 (April, 2003).
5. <http://www.pishaper.com/indpi.php#prod 12/12/2017>.
6. <http://www.pishaper.com/focalpish.php 12/12/2017>.
7. Yadroitseva I., Shishkovsky I., Bertranda P., Smurova I. Manufacturing of fine-structured 3D porous filter elements by selective laser melting. – Applied Surface Science, 1 March 2009, v. 255, Issue 10, p. 5523–5527.
8. Laskin A., Faidel D., Laskin V. Optics to Control Thermal Effects in Selective Laser Melting. – SPIE, Photronics West Proc., 2018.

the form of the windows made of special glass, self-compensating thermal effects, but this topic is beyond the scope of this article.

To equalize the temperature distribution in the melt pool, Focal- π Shaper has been successfully applied allowing to manage the distribution of the intensity of the focused spot, an example optical system of 3D- printer is shown in Fig. 9.

Single-mode radiation of fiber laser is transformed by collimating Focal- π Shaper into a collimated beam from the Airy disk intensity distribution and is further focused by the lens to a working plane, the image is recorded using a scanner [3]. The spot resulting at a lens focal plane has even distribution intensity (flat-top) or "doughnut". Due to heating properties of heat-conducting materials, it is the "doughnut" which is optimal for SLM technologies because it provides an even temperature distribution and stability of the process.

The optical system given above was applied at experimental installation for tests of SLM technologies with different allocations of intensity and different protective glasses. Let's compare the image recording processes, obtained from using Gaussian operational spots and spots with "doughnut-like" temperature distribution (Fig. 10). The measurements of distributions and results of steel plate engraving are shown in figure's bottom.

CONCLUSION

The examples considered allow us to draw the following conclusions:

- significantly lesser arcing in the case of using "doughnut" justifies the necessity of uniform temperature in the powder melt zone;
- "doughnut-like" intensity distribution allows for more efficient use of the laser energy and performance of the process;
- examination of the manufactured parts showed a lower porosity with the "doughnut-like" spot recording.

In general, the study of the SLM process and measurements of actual manufactured parts has confirmed the correctness of the proposed approach to control intensity distribution by means of focused laser spot and to apply protective windows made of special glass in order to enhance the performance and stability of the technological process.