

УДК 535:628.373.8, 535:548

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ

Н.А. Хило, Н.С. Казак, С.В. Солоневич, А.А. Рыжевич

*Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск*

## LASER RADIATION CONVERTERS ON THE BASE OF CRYSTALS

N.A. Khilo, N.S. Kazak, A.A. Ryzhevich, S.V. Solonevich

*B.I. Stepanov Institute of Physics NAS of Belarus, Minsk*

Разработан и изготовлен компактный преобразователь лазерного излучения на основе двуосного кристалла, ориентированного вдоль бинормали. Устройство предназначено для аподизации и уменьшения расходимости лазерных пучков, а также для формирования полых световых пучков с дислокацией волнового фронта. Оптические элементы преобразователя пригодны для трансформации мощного импульсного и непрерывного лазерного излучения. Полученные при этом пучки могут распространяться в прозрачных средах на большое расстояние. Устройство перспективно в использовании для манипуляции частицами по принципу лазерного пинцета, для лазерной обработки материалов, для воздействия на органические клетки и их компоненты, а также в интерферометрии и профилометрии.

**Ключевые слова:** лазерный пучок, преобразователь лазерного излучения, кристалл, аподизация, многокольцевой световой пучок.

We designed and made a compact laser radiation converter on the basis of a biaxial crystal oriented along its binormal. The device is designed for apodization and decreasing laser beam divergence, as well as for shaping hollow light beams with a wave front dislocation. Optical elements of the converter allow to transform both pulsed, and continuous powerful laser radiation. It is possible to transfer converted beams at large distance in transparent media. The device holds much promise for manipulation by particles on the principle of a laser tweezer, for laser processing of materials, for influence on organic cells and its components, and in interferometry and profilometry.

**Keywords:** laser beam, laser radiation converter, crystal, apodization, multi-ring light beam.

### Введение

При использовании лазерных пучков часто требуется плавно регулировать диаметр их поперечного сечения. Конструкция подавляющего большинства лазеров не позволяет этого сделать непосредственно. Для увеличения диаметра пучка обычно применяют телескопы. При увеличении поперечного размера пучка посредством телескопа его расходимость уменьшается, но при уменьшении поперечного размера пучка этим способом расходимость излучения увеличивается, что в большинстве случаев нежелательно. Для уменьшения диаметра пучка применяют также круглые диафрагмы, однако их применение влечет за собой существенные дифракционные искажения в распределении интенсивности пучка, что во многих случаях нежелательно, особенно при управлении движением частиц малых размеров. Кроме того, круглые диафрагмы имеют фиксированный размер, вследствие чего невозможно оперативно перестраивать диаметр выходного пучка. С применением ирисовых диафрагм удастся плавно изменять размер пучка, однако не устраняются дифракционные искажения. Во избежание дифракционных искажений при одновременном уменьшении диаметра лазерного пучка во многих случаях применяют так называемые аподизирующие диафрагмы различных конструкций [1]–[5], коэффициент пропускания которых плавно изменяется при изменении

радиальной координаты, например, вследствие соответствующего изменения коэффициентов поглощения и/или отражения. «Мягкие» диафрагмы в большинстве случаев также имеют фиксированные размеры. Актуальной является задача изменения диаметра выходного лазерного пучка без увеличения при этом его расходимости и без внесения нежелательных искажений в распределение интенсивности в его поперечном сечении. В настоящей работе описан созданный авторами преобразователь на основе двуосного кристалла, пригодный для решения этой и некоторых других задач по формированию световых пучков.

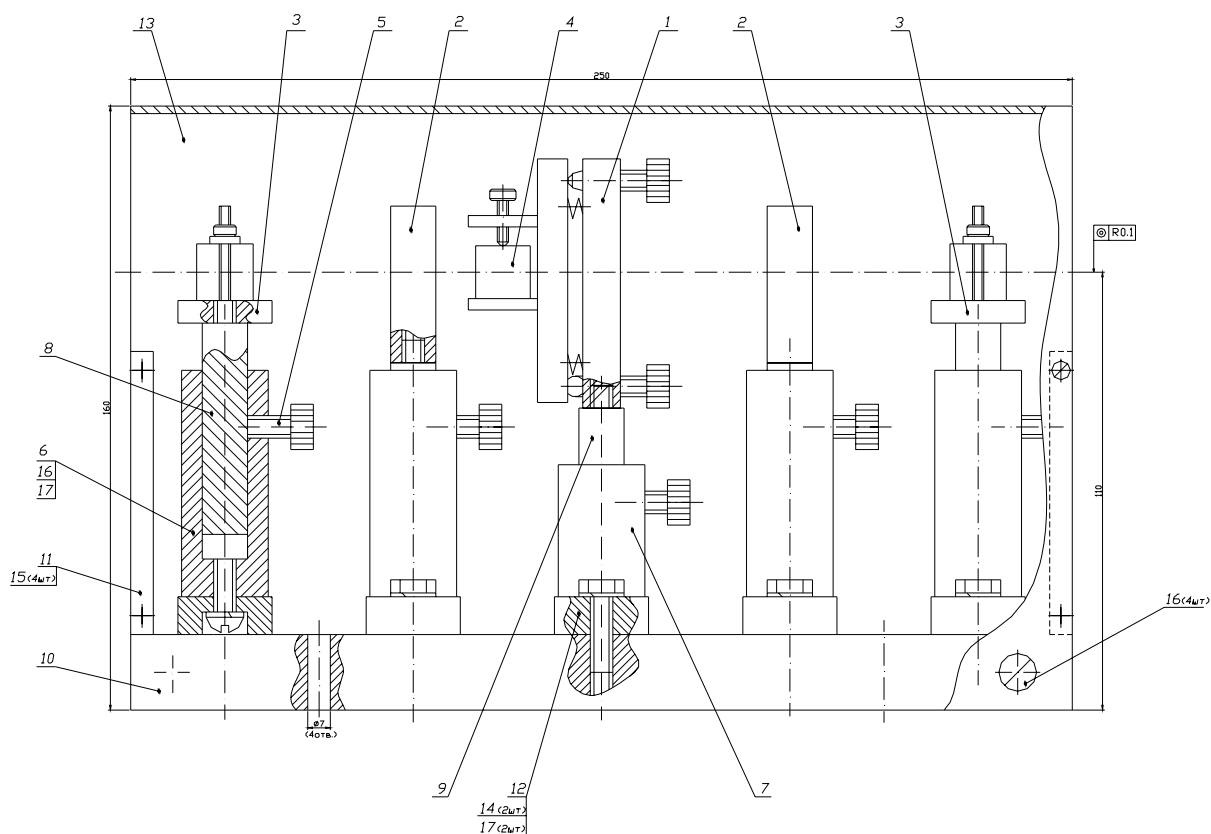
### 1 Конструкция и принцип работы преобразователя лазерного излучения на основе двуосного кристалла

При распространении циркулярно поляризованной световой волны в двуосном кристалле, ориентированном вдоль его бинормали, происходит ее преобразование в две волны, циркулярно поляризованные в противоположных направлениях, одна из которых имеет дислокацию волнового фронта [6]–[8]. Парциальные коэффициенты преобразования зависят от угла между бинормалью кристалла и направлением распространения света. При распространении расходящегося аксиально симметричного светового пучка вдоль бинормали двуосного кристалла он

может быть преобразован в многокольцевой световой пучок (МКСП), обладающий или не обладающий винтовой дислокацией волнового фронта (ВДВФ) [8]. В целях практического использования этого полезного свойства двусных кристаллов нами разработан компактный преобразователь лазерного излучения, сборочный чертеж которого приведен на рисунке 1.1. Преобразователь предназначен для трансформации обычного линейно поляризованного лазерного пучка в МКСП необходимой конфигурации. Нами собран действующий макет преобразователя, оптическая схема которого приведена на рисунке 1.2, а фотография – на рисунке 1.3. Механические элементы преобразователя изготовлены с участием авторов данной работы на производственной базе Государственного научного учреждения «Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси».

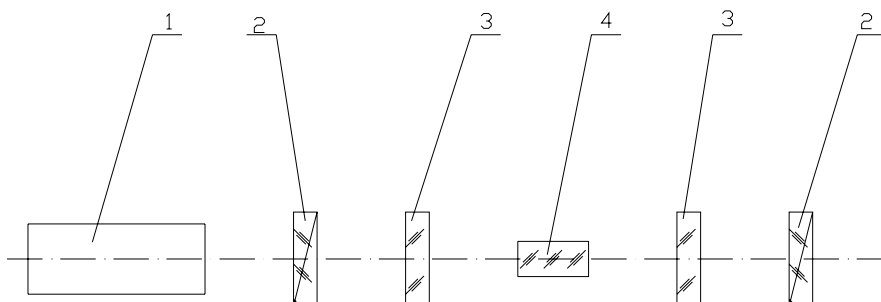
Для демонстрации работы макета использовался гелий-неоновый лазер типа ГН-2П-1, генерирующий одномодовый линейно-поляризованный гауссов пучок, угловая расходимость которого составляла около 0,5 градуса по уровню  $\frac{1}{2}$ , и степень поляризации превышала 0,99. Для

получения циркулярно-поляризованного излучения применялась четвертьволновая пластинка, просветленная для излучения с длиной волны 633 нм и специальным образом ориентированная относительно плоскости поляризации исходного линейно-поляризованного пучка. В качестве двусного кристалла применялся кристалл КТР – титанил фосфат калия  $\text{KTiOPO}_4$  – с размерами  $8 \times 8 \times 12 \text{ мм}^3$ . Последний габарит является толщиной (длиной) кристалла; параллельно этому ребру кристаллического параллелепипеда ориентирована бинормаль кристалла. После кристалла располагалась еще одна четвертьволновая пластинка, идентичная первой по размерам и ориентации. В качестве поляризатора использовался поляризатор – призма Глана. Все оптические элементы схемы стойки к воздействию лазерного излучения большой мощности. Перед преобразователем и после него могут устанавливаться сферические линзы. Посредством их перемещения при необходимости можно регулировать расходимость и диаметр светового пучка, падающего на преобразователь и выходящего из него [8].



1 – юстировочный держатель кристалла с двумя вращательными степенями свободы, 2 – держатель четвертьволновой пластинки, 3 – держатель поляризатора (призмы Глана), 4 – двусный кристалл, 5 – зажимной винт, 6 – втулка, 7 – короткая втулка, 8 – шток, 9 – короткий шток, 10 – основание, 11 – упор для крышки, 12 – основание держателя, 13 – крышка, 14 – болт, 15 – винт, 16 – винт, 17 – шайба

Рисунок 1.1 – Чертеж преобразователя



1 – лазер; 2 – поляризатор; 3 – четвертьволновая пластинка; 4 – двуосный кристалл

Рисунок 1.2 – Оптическая схема действующего макета преобразователя

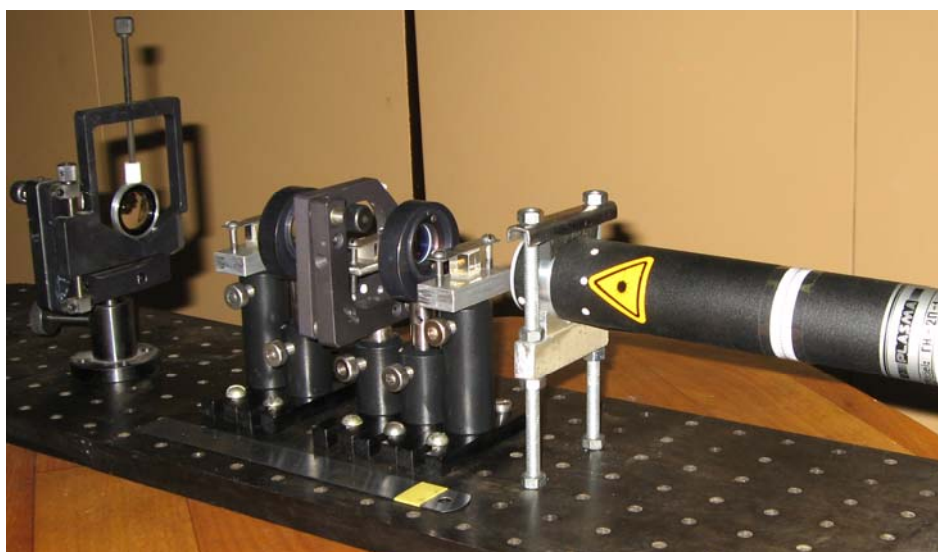


Рисунок 1.3 – Действующий макет преобразователя

В зависимости от взаимной ориентации в схеме четвертьволновых пластинок и поляризаторов на выходе преобразователя формируется световой пучок, имеющий или не имеющий ВДВФ (рисунок 2.1). Выходной однокольцевой пучок с ВДВФ, на оси которого интенсивность минимальна, может быть полезен для проведения импульсной лазерной сварки, после его преобразования в бесселев световой пучок ненулевого порядка – для управления микро- и наночастицами [9], а также для создания профилометров [10]. Вследствие низкой интенсивности света вблизи оси кольцевого пучка в профилометрии цилиндрических изделий удаётся существенно ослабить влияние нежелательной дифракции на торце изделия, обуславливающей искажение результатов измерений при использовании обычных гауссовых пучков. Конструкция преобразователя приспособлена для лёгкой замены двуосного кристалла одноосным, ориентированным соответствующим образом [11]–[13], и получения таким образом МКСП с ВДВФ второго порядка, так как при распространении циркулярно-поляризованного светового пучка в одноосном кристалле происходит изменение порядка

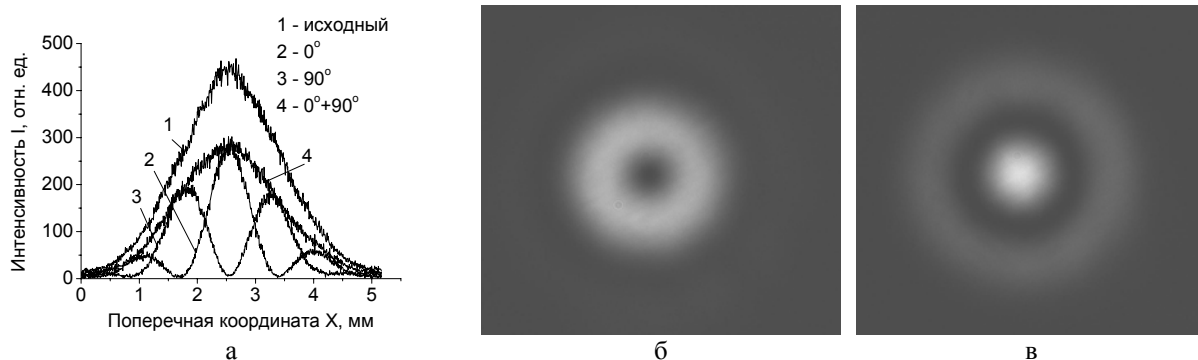
винтовой дислокации сразу на 2 единицы. При этом приосевая область низкой интенсивности полого пучка увеличивается в диаметре.

### 2 Анодизация лазерных световых пучков с применением преобразователя лазерного излучения на основе двуосного кристалла

Рассмотрим возможность применения МКСП без ВДВФ. Пучок без ВДВФ имеет распределение интенсивности, которая модулирована вдоль радиальной оси координат  $\rho$  в соответствии с функцией квадрата косинуса:

$$I(\rho) \sim \cos^2(Z2\pi\alpha L\rho/\lambda),$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения;  $\alpha$  – параметр анизотропии двуосного кристалла,  $L$  – длина кристалла,  $Z$  – коэффициент пропорциональности, в силу расходимости пучка зависящий от продольной координаты [6]–[8]. На оси выходных многокольцевых пучков без ВДВФ формируется максимум интенсивности, окруженный темным кольцом, в пределах которого при увеличении значения радиальной координаты интенсивность света сначала плавно уменьшается до 0 и затем вновь возрастает. Основная идея



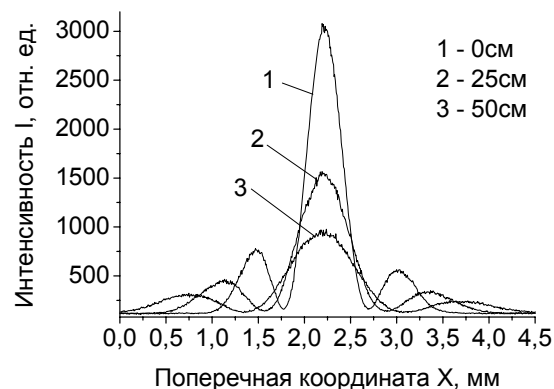
а – диаметральной, б – в сечении МКСП с ВДВФ, в – в сечении МКСП без ВДВФ  
Рисунок 2.1 – Распределения интенсивности света в поперечных сечениях пучков

метода аподизации состоит в том, чтобы разместить в поперечном сечении выходного многокольцевого пучка без ВДВФ круглую диафрагму с диаметром апертуры, равным диаметру окружности, охватывающей центральный максимум пучка без ВДВФ, на которой интенсивность излучения равна нулю. При этом выполняется условие  $Z2\pi\alpha L\rho/\lambda = \pi/2$ , т.е.  $4Z\alpha L\rho/\lambda = 1$ . На рисунке 2.1, а показаны зарегистрированные распределения интенсивности в начальном пучке, не прошедшем через систему «поляризатор – кристалл – анализатор» (рисунок 2.1, а; кривая 1), в пучке без ВДВФ (рисунок 2.1, а; кривая 2), в отделённом пучке с ВДВФ (рисунок 2.1, а; кривая 3) и рассчитанное суммарное распределение интенсивности, полученное в результате сложения значений функций, представленных на рисунке 2.1, а кривыми 2 и 3, при каждом значении их аргумента.

Расходимость МКСП, полученных в результате преобразования, не отличается от расходимости исходных пучков, падающих на преобразователь. Для увеличения количества колец необходимо увеличить расходимость пучка, проходящего через кристалл, что легко достигается использованием сферической линзы, установленной в любом месте перед кристаллом. Изменение диаметрального распределения интенсивности МКСП за преобразователем при увеличении расстояния (в см) от фокусирующей линзы продемонстрировано на рисунке 2.2. При аподизации диафрагмированием выделяется только осевой максимум интенсивности, расходимость которого всегда меньше, чем расходимость исходного пучка. После кристалла в любом месте может быть установлена вторая сферическая линза, посредством которой регулируется расходимость выходного пучка.

Для аподизации методом диафрагмирования МКСП без ВДВФ нами вначале была использована ирисовая диафрагма с десятью лепестками, посредством которой можно варьировать диаметр апертуры пропускаемого пучка. На рисунке 2.3 приведены для сравнения распределения интенсивностей в пучках, диафрагмированных

ирисовой диафрагмой оптимальной апертуры (2,84 мм) – прошедшем через преобразователь пучке без ВДВФ (а) и исходном пучке (б).



Кристалл длиной 12 мм; линза с фокусным расстоянием  $f = 16$  см

Рисунок 2.2 – Поперечные распределения интенсивности в МКСП вдоль диаметра поперечного сечения пучка за преобразователем на различных расстояниях от линзы (в см)

Аподизированный с применением кристалла преобразователя пучок имеет гораздо более однородное распределение интенсивности и существенно меньшую расходимость, чем диафрагмированный без использования кристалла исходный пучок. Если диаметр отверстия диафрагмы оптимален, в выходном аподизированном пучке дополнительные модуляции, связанные с дифракцией света на краю диафрагмы, проявляются слабее всего (рисунок 2.3, а). Однако, несмотря на довольно высокое качество аподизированного пучка, применяя ирисовую диафрагму, не удастся достичь полной гладкости распределения интенсивности пучка в силу отличия формы отверстия от круглой. В распределении интенсивности наблюдается азимутальная модуляция с осевой симметрией 10-го порядка, обусловленная тем, что выходное отверстие ирисовой диафрагмы представляет собой правильный десятиугольник. Даже при максимальной близости многоугольного края ирисовой диафрагмы к окружности с нулевой интенсивностью

вблизи углов многоугольной диафрагмы свет пропускается, а вблизи середин сторон – происходит его отсечение, пусть и небольшой, но всё же ненулевой интенсивности.

Пучки, аподизированные с применением круглой диафрагмы, имеют более гладкое распределение интенсивности. На рисунках 2.4 и 2.5 представлены распределения интенсивности в пучках – диафрагмированных круглой диафрагмой оптимального диаметра и недиафрагмированных.

Из полученных результатов следует, что наилучшие возможности для аподизации

световых пучков обеспечиваются при применении диафрагмы с отверстием, наиболее близким по форме к круглому. Однако, если можно допустить небольшие по контрасту модуляции интенсивности в выходном пучке, то для осуществления оперативного изменения параметров схемы более удобно использование ирисовой диафрагмы.

Аподизированные световые пучки без ВДВФ при распространении в пространстве столь же устойчивы, как и гауссовы световые пучки соответствующих поперечных размеров.

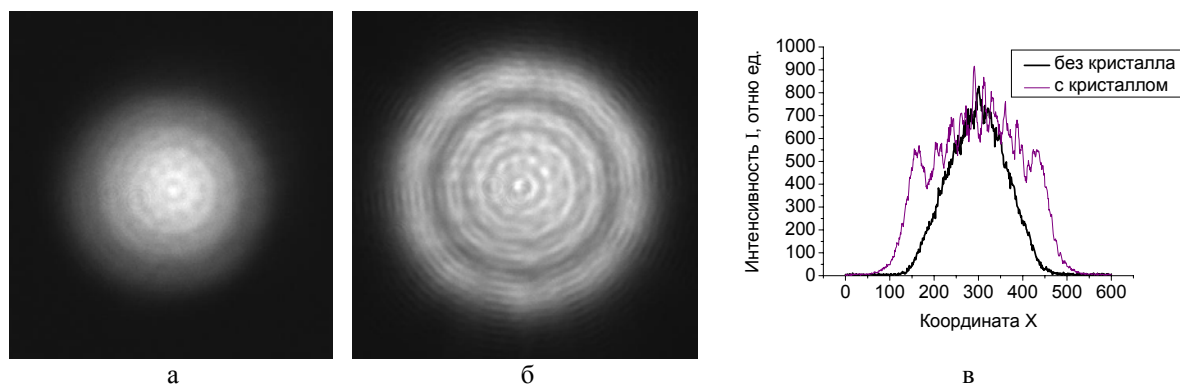
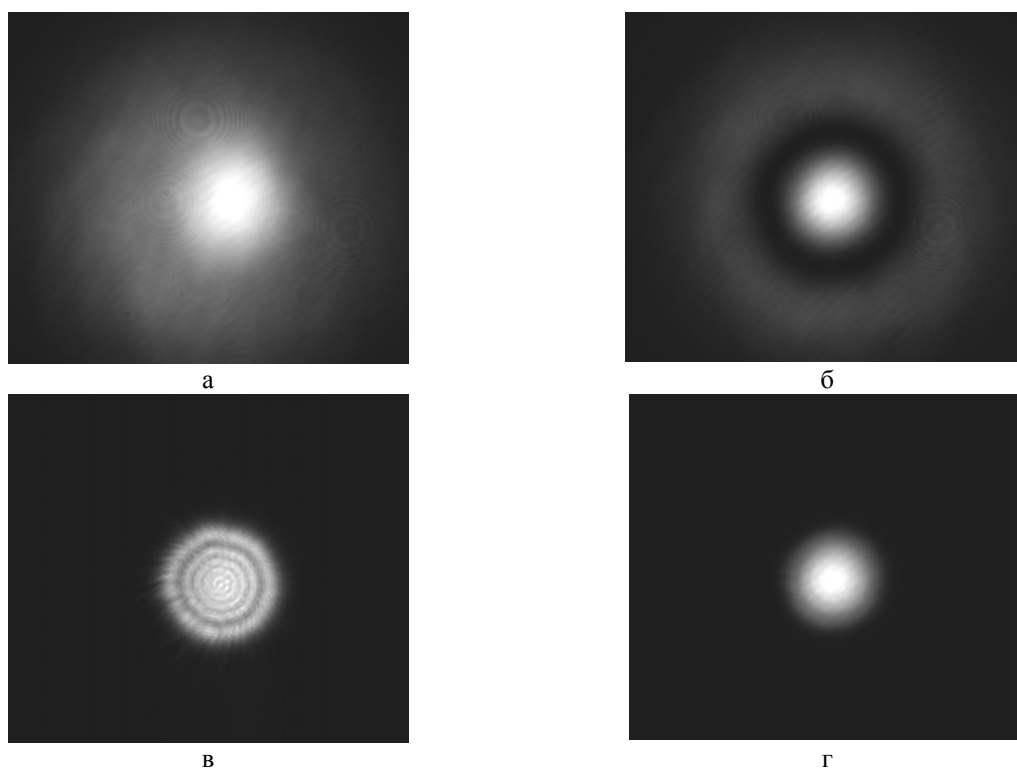


Рисунок 2.3 – Диафрагмированные ирисовой диафрагмой МКСП без ВДВФ (а) и исходный световой пучок (б) и распределение интенсивности вдоль диаметра поперечного сечения пучка (в)



а – без кристалла, без диафрагмы, б – с кристаллом, без диафрагмы, в – без кристалла, с диафрагмой, г – с кристаллом, с диафрагмой

Рисунок 2.4 – Распределение интенсивности в поперечном сечении диафрагмированного и недиафрагмированного светового пучка

Кроме того, полученные описанным методом пучки отклоняются и фокусируются так же, как и обычные гауссовы, что делает возможным их применение в различных технологических и измерительных установках, а также в целях управления микро- и наночастицами.

Предложенная оптическая схема преобразователя проверена в работе с мощным непрерывным аргоновым лазером ЛГН-512. В силу довольно большой мощности лазерного излучения (до 4 Вт) работа с пучком этого лазера представляет высокую опасность для зрения исследователя, поэтому преобразователь обязательно должен быть заключен в кожух, препятствующий распространению излучения, отраженного от граней оптических элементов.

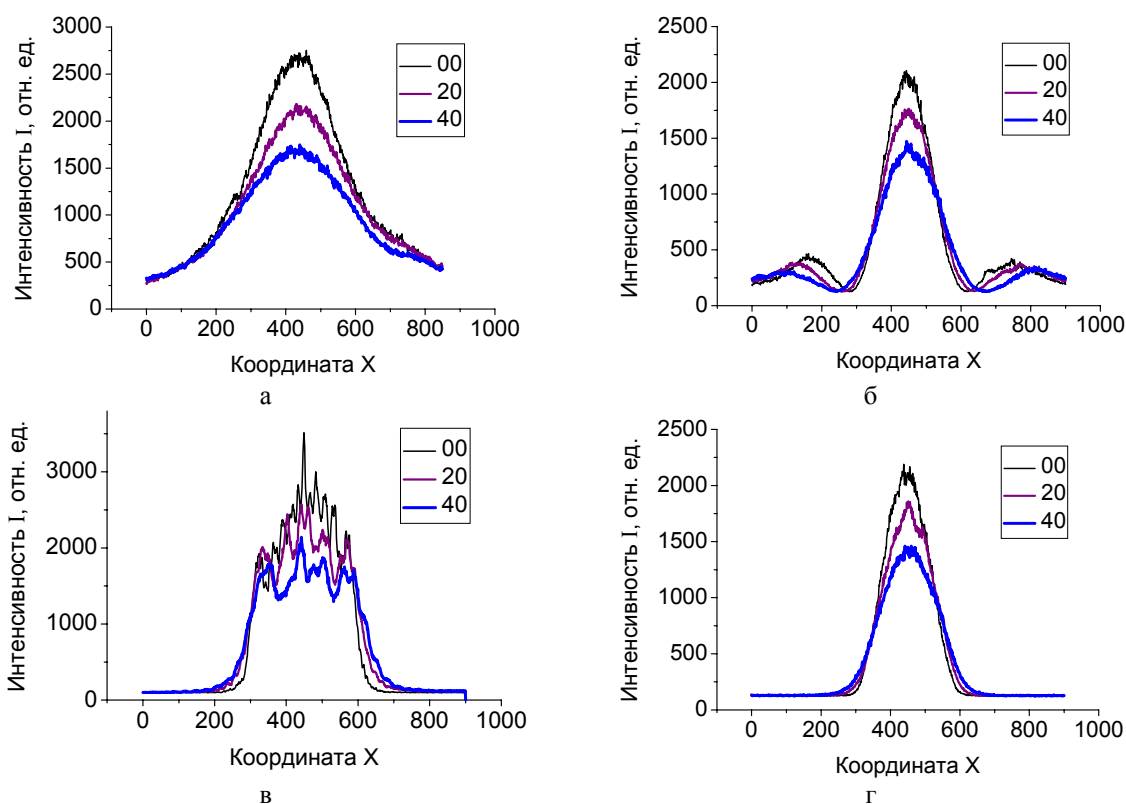
Для минимизации потерь излучения и предотвращения нагрева оптических элементов их входные и выходные грани должны быть просветлены для излучения используемого лазерного источника. Во избежание повреждения оптических элементов на них не должна попадать пыль, поэтому входное и выходное отверстия кожуха должны быть закрыты просветленными защитными стеклами. Начальный лазерный пучок имеет видимый диаметр около 4 мм, что обуславливает необходимость использования кристалла с достаточно большой апертурой.

Аналогичные требования предъявляются к конструкции преобразователя при работе с импульсными лазерами с модулированной добротностью. При аподизации излучения высокой мощности необходимо применять только металлические диафрагмы, предпочтительно охлаждаемые, посредством которых обеспечивается эффективное рассеяние поглощаемой световой энергии. Заметим, что все отмеченные выше закономерности аподизации с применением двуосного кристалла выполняются и при преобразовании мощных лазерных пучков.

### Заключение

На основе двуосного кристалла, ориентированного вдоль бинормали, разработан компактный преобразователь лазерного излучения, сравнительно простой в изготовлении и сборке. Все оптические элементы, входящие в состав устройства, обладают высокой лучевой прочностью и пригодны для преобразования мощного лазерного излучения.

Авторами собран действующий макет преобразователя, с применением которого на основе сингулярных свойств кристаллов реализовано формирование многокольцевых световых пучков, которым свойственно наличие или отсутствие винтовой дислокации волнового фронта.



а – без кристалла, без диафрагмы, б – с кристаллом, без диафрагмы,  
в – без кристалла, с диафрагмой, г – с кристаллом, с диафрагмой

Рисунок 2.5 – Диаметральное распределение интенсивности в поперечном сечении диафрагмированного и недиафрагмированного пучка при различных расстояниях от диафрагмы (указаны в сантиметрах числами в рамках)

Продемонстрирован метод аподизации световых пучков, обеспечивающий получение качественного распределения интенсивности в поперечном сечении светового пучка, который отличается от исходного меньшим диаметром и расходимостью.

Исследованы особенности световых пучков, аподизированных с применением кольцевой и ирисовой диафрагмы. Выявлены основания для выбора оптических и механических элементов в зависимости от требований к качеству выходного пучка. Оптические элементы схемы пригодны для аподизации мощных лазерных пучков – как импульсных, так и непрерывных. Отделяемое лазерное излучение является линейно поляризованным и также может быть использовано в сопутствующих процессах.

Разработанный метод аподизации аксиально симметричных световых пучков достаточно прост в реализации, характеризуется достаточно высоким (около 50%) КПД преобразования и не приводит к таким нежелательным явлениям, как дифракционное увеличение расходимости и радиальная модуляция интенсивности. Этими особенностями метода обусловлены перспективы его использования в нанотехнологиях для манипулирования частицами по принципу лазерного пинцета, для технологической обработки материалов, для воздействия на органические клетки и ее составляющие, а также возможности применения в интерферометрии и профилометрии.

Схема аподизирования с применением двусосного кристалла пригодна для формирования как сходящихся и расходящихся, так и коллимированных МКСП. Этим обеспечена возможность передачи их на большие расстояния и применения для исследования протяженных прозрачных сред, таких, например, как газы и жидкости. Вследствие малости поперечного размера сфокусированных световых пучков возможно их применение в различных нанотехнологиях в целях создания высокоградиентных оптических ловушек, а также для лазерной обработки материалов. Аподизированные световые пучки высокого качества, обладающие или не обладающие ВДВФ, с применением аксикона легко могут быть трансформированы в качественные бесселевы световые пучки (соответственно ненулевого и нулевого порядков). Полученные таким образом бесселевы пучки также можно применять для управления движением микрочастиц и организации нелинейно-оптических процессов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Аподизация световых пучков как метод повышения яркости лазерных установок на неодимовом стекле* / С.Г. Лукишова [и др.] // Труды ИОФАН. – 1987. – Т. 7. – С. 92–147.
2. *Soft diaphragms for apodization of powerful laser beams* / L.M. Vinogradsky [et al.] // *Advanced*

*High-Power Lasers: Proc. SPIE.* – 2000. – Vol. 3889. – P. 849–860.

3. *Senatsky, Yu.V.* Laser beams apodization by light scattering / Yu.V. Senatsky // *Conference on Lasers & Electro Optics (CLEO-2001) : tech. digest of the conf., Baltimore, USA, May 6-11 2001 / The Baltimore Convention Center.* – Baltimore, 2001. – P. 160.

4. *Pyatakhin, M.V.* Formation of the intensity distribution in laser beams due to diffraction on the structure of small-size optical inhomogeneties / M.V. Pyatakhin, Yu.V. Senatsky // *J. of Russian Laser Research.* – 2002. – Vol. 23, № 4. – P. 332–346.

5. *Аподизаторы для получения одномодовой генерации в лазерах* / Ю.В. Сенатский [и др.] // *Изв. РАН. Сер. физ.* – 2002. – Т. 66, № 7. – С. 919–923.

6. *Казак, Н.С.* Формирование бесселевых световых пучков в условиях внутренней конической рефракции / Н.С. Казак, Н.А. Хило, А.А. Рыжевич // *Квантовая электроника.* – 1999. – Т. 29, № 2. – С. 184–188.

7. *Formation of higher-order Bessel light beams in biaxial crystals* / T.A. King [et al.] // *Optics Communications.* – 2001. – Vol. 187, Issue 4–6. – P. 407–414.

8. *Казак, Н.С.* Формирование и преобразование бесселевых многокольцевых световых пучков / Н.С. Казак, Е.Г. Катранжи, А.А. Рыжевич // *ЖПС.* – 2002. – Т. 69, № 2. – С. 242–247.

9. *Рыжевич, А.А.* Новый метод формирования бесселевых световых пучков первого порядка и возможность их применения в нанотехнологиях / А.А. Рыжевич // *Опт. журнал.* – 2001. – Т. 68, № 3. – С. 54–55.

10. *Солоневич, С.В.* Лазерный профилометр на основе конических световых пучков для определения качества цилиндрических поверхностей / С.В. Солоневич, А.А. Рыжевич // *Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук.* – 2006. – № 5. – С. 112–114.

11. *Хило, Н.А.* Преобразование порядка бесселевых световых пучков в одноосных кристаллах / Н.А. Хило, А.А. Рыжевич, Е.С. Петрова // *Квантовая электроника.* – 2001. – Т. 31, № 1. – С. 85–89.

12. *Propagation of high-order circularly-polarized Bessel beams and vortex generation in uniaxial crystals* / V.N. Belyi [et al.] // *Optical Engineering.* – 2011. – Vol. 50, 059001. – P. 1–9; doi:10.1117/1.3572109.

13. *Гиргель, С.С.* Бесселевы световые поля в одноосных кристаллах / С.С. Гиргель // *Гомельский научный семинар по теоретической физике, посвященный 100-летию со дня рождения Ф.И. Федорова : материалы, Гомель, 20–22 июня 2011 г. / ГГУ им. Ф. Скорины.* – Гомель, 2011. – С. 17–22.

Поступила в редакцию 17.11.11.