

отклонения строится калибровочный график, показывающий зависимость изменения диаметра светового кольца на датчике камеры 9 от отклонения поверхности  $\Delta b$ . По локальному изменению диаметра светового кольца смещению пятна определяется отклонение от образующей поверхности в соответствующем месте. Затем цикл смещение – регистрация – определение отклонения повторяется вдоль заданного участка объекта, благодаря чему определяется профиль поверхности покрытия.

С помощью изготовленного нами образца устройства, изменения увеличение регистрирующей системы, состоящей из микроскопического объектива и CCD-камеры, можно измерять отклонения поверхности от образующей не менее, чем на 5 мм в обе стороны с абсолютной погрешностью, не превышающей 1% от заданного диапазона измерений. Предельное разрешение устройства как вдоль оси поверхности определяется техническими характеристиками используемой системы позиционирования. В изготовленном нами образце устройства предельное продольное разрешение составляет 10 мкм. Данное устройство без внесения каких-либо конструктивных изменений может применяться для дефектоскопии непрозрачных защитных покрытий на плоских и цилиндрических изделиях толщиной 1-5 мкм при диаметре поверхности изделия до 2 м. Ценность комбинированного метода проверки в том, что само по себе изменение профиля поверхности покрытия еще не означает, что покрытие отсутствует или повреждено в данном месте изделия. На рисунке 2 приведены результаты измерений профиля поверхности и интенсивности отраженного света для дефекта в виде отсутствия покрытия. Достаточным призна-

ком дефекта является одновременное отличие профиля поверхности покрытия в виде углубления в сочетании с изменением на этом же участке поверхности интенсивности отраженного света, как на рисунке 2 (а, б). В случаях царапины или углубления изменение рельефа поверхности не сопровождается изменением отражения, благодаря чему можно исключить некритические отклонения из последующего рассмотрения на предмет исправления или отбраковки.

Таким образом, нами предложен и опробован с помощью изготовленного устройства метод обнаружения дефектов покрытия на внутренних цилиндрических поверхностях. Метод реализуется посредством сканирования контролируемой поверхности покрытия лазерным пучком, развернутым в виде тонкой кольцевой полосы. Устройство довольно компактно, благодаря чему его можно перемещать специальным манипулятором внутри прямолинейных полых цилиндрических изделий как на цилиндрическом модуле с подпружиненными катками, так и в подвешенном виде по направляющей, закрепленной внутри изделия параллельно его оси, тогда устройство вообще не будет непосредственно контактировать с исследуемой поверхностью. Поскольку место дефекта может определяться и регистрироваться с достаточно большой точностью, в ряде случаев дефекты покрытия могут быть исправлены сразу после проверки качества.

В процессе измерений с помощью описанного устройства можно использовать лазерное излучение сравнительно малой мощности, безопасное для органов зрения и не оказывающее разрушающего воздействия на поверхность объектов.

УДК 535:628.373.8, 535:548

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИАЛЬНО ИЛИ АЗИМУТАЛЬНО ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ

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

*Институт физики НАН Беларуси*

*Минск, Республика Беларусь*

В настоящее время наблюдается рост интереса к световым пучкам, обладающим азимутальной (векторы электрической составляющей перпендикулярны направлению распространения электромагнитной волны и при этом лежат на касательных к окружностям, центры которых находятся на оптической оси пучка) и, особенно, радиальной поляризации (векторы электрической составляющей поля лежат на лучах, радиально расходящихся от оптической оси пучка). Интерес к данным пучкам объясняется, прежде всего, инвариантностью особенностей их отра-

жения от цилиндрических и конических поверхностей поверхности даже при больших углах падения, благодаря чему можно производить контроль качества изделий, имеющих аксиальную симметрию с большей точностью, а также формировать аксиально симметричные перетяжки линзовыми системами с высокой числовой апертурой. Радиально поляризованные пучки, сфокусированные объективами с высокой числовой апертурой, имеют в фокусе сильную нераспространяющуюся продольную составляющую электрического поля и могут обеспечить суще-

ственно меньшие размеры светового пятна в фокусной плоскости по сравнению с линейно и циркулярно поляризованными пучками, благодаря чему позволяют обеспечить высокую точность лазерной обработки материалов, высокую плотность мощности в месте взаимодействия излучения с веществом. Кроме того, они могут быть использованы для захвата манипуляции частиц меньших размеров, чем это возможно с пучками, имеющими линейную или циркулярную поляризацию. Существуют способ и устройство для формирования световых пучков, имеющих радиальную поляризацию с использованием конической призмы Брюстера [1]. Для реализации данного способа необходим сложный в изготовлении и, как следствие, дорогостоящий оптический элемент с многослойными покрытиями. Кроме того, этот способ не предоставляет возможности получения азимутально поляризованного светового пучка. Известны способ и устройство для внутрирезонаторного формирования радиально поляризованного светового пучка с использованием двулучепреломляющего активного элемента, изготовленного из кристалла Nd:YVO<sub>4</sub> [2]. Как и предыдущий, этот способ не позволяет формировать световой пучок с азимутальной поляризацией. Кроме того, этот способ также сложен с технической точки зрения, поскольку требует равномерной, т.е. осесимметричной накачки активного элемента. Кроме того, в силу наличия поглощающей диафрагмы внутри резонатора КПД данного устройства для генерации радиально поляризованного пучка будет существенно ниже, чем у источника линейно поляризованного лазерного излучения без такого селектирующего элемента. В [3] предложен способ формирования радиально или азимутально поляризованного светового пучка, состоящий в пропускании исходного линейно поляризованного монохроматического конусного светового пучка с заданной длиной волны  $\lambda$  через двусный кристалл заданной длины  $L$ , бинормаль которого параллельна оси симметрии светового пучка и перпендикулярна входной грани кристалла. Световой пучок формировали с углом конусности  $\gamma$ , отвечающим условию  $\gamma = \arcsin((2n+1)\lambda/4La)$ , где  $a$  и  $n$  – соответственно параметр анизотропии кристалла и любое целое число, и поляризуют таким образом, чтобы обеспечить на входе в кристалл колебания вектора напряженности электрического поля пучка в направлении оси X или оси Y кристалла, лежащей в плоскости его входной грани и соответственно параллельной или перпендикулярной плоскости бинормалей, для получения на выходе радиально или азимутально поляризованного светового пучка соответственно в первом и во втором случае. Оптическая схема, которую использовали в [3] для реализации предложенного

метода, включала перестраиваемый телескоп, который устанавливался после аксикона с целью вариативного изменения угла конусности беселева светового пучка, формируемого аксиконом, чтобы обеспечить приведенное выше условие. Перестраиваемый телескоп в силу своей конструкции не позволяет сохранить его соосность относительно остальных оптических элементов и наклон относительно оси пучка в процессе перестройки увеличения телескопа, из-за чего после подстройки угла конусности необходима дополнительная кропотливая юстировка телескопа. Невозможна в этом случае и автоматизация, которая была бы очень желательна, поскольку при изменении температуры в помещении, и соответственно температуры кристалла, его параметр анизотропии также изменяется, что приводит к изменению необходимого для полного преобразования угла конусности выходного пучка.

Нами предложено устройство для формирования радиально или азимутально поляризованных световых пучков с электронно-механическим узлом, позволяющим осуществлять плавную подстройку угла конусности конического пучка, падающего на кристалл с целью полного преобразования линейно поляризованного светового пучка в радиально или азимутально поляризованный. Схема устройства показана на рисунок 1.

В качестве лазера 1 может использоваться использовался любой лазер, генерирующий монохроматическое излучение. Лазерное излучение в зависимости от конструкции лазера может быть линейно поляризованным или неполяризованным, но неполяризованное лазерное излучение

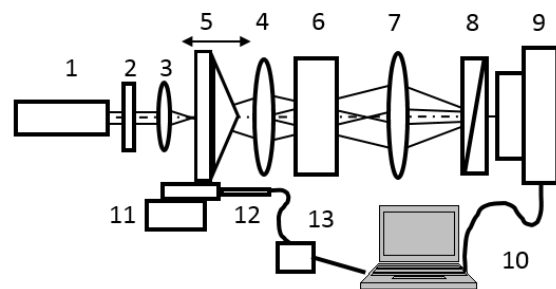


Рисунок 1 – Конструкция устройства для формирования радиально или азимутально поляризованного светового пучка (номерные позиции рисунка описаны в тексте).

после выхода из лазера должно быть преобразовано в линейно поляризованное посредством соответствующего поляризатора. Электрический вектор электромагнитного поля излучения лазера должен быть для определенности ориентирован либо вертикально, либо горизонтально. Поворотом полуволновой пластинки 2 на 90° можно переключать ориентацию вектора с горизонтальной на вертикальную или наоборот. Затем, линейно

поляризованный световой пучок пропускается через систему из двух положительных линз 3 и 4, составляющих телескоп. Между ними размещается коническая линза (аксикон) 5, формирующая бесселев световой пучок, проходящий через двусный кристалл 6, ось X которого лежит в плоскости оптических осей (бинормалей) двусного кристалла и перпендикулярна той бинормали, вдоль которой ориентирован кристалл. Ось Y кристалла перпендикулярна оси X кристалла и перпендикулярна плоскости оптических осей (бинормалей) кристалла. Ориентация осей X и Y кристалла однозначно задается при его изготовлении. Как правило, боковые грани кристалла, ориентированного вдоль бинормали, попарно параллельны соответственно оси X и оси Y, однако могут быть ориентированы и по-другому, что не повлияет на выполнение назначения описываемого устройства. Достаточно, чтобы входная и выходная грани кристалла были перпендикулярны одной из двух бинормалей (оптических осей) двусного кристалла, а входящий в кристалл свет мог быть линейно поляризован как в плоскости, параллельной оси X, так и в плоскости, параллельной оси Y. Если плоскость колебаний напряженности электрического поля входного пучка параллельна оси X кристалла, на выходе из кристалла получают радиально поляризованный конический световой пучок, если плоскость колебаний напряженности электрического поля входящего светового пучка параллельна оси Y кристалла, на выходе получают азимутально поляризованный конический световой пучок. С помощью положительной сферической линзы 7 конический пучок можно преобразовать в фокусной плоскости линзы в кольцевое поле, поляризацию которого удобно контролировать с помощью поляризатора-анализатора 8 и CCD-камеры 9, сопряженной с компьютером 10.

Плавное изменение угла конусности конического пучка достигается перемещением аксикона 5 внутри телескопа с помощью электромеханического узла, состоящего из механического транслятора 11, моторизованного актуатора 12 модели Z825B (производства «Thorlabs», США) и контроллера двигателя 13, сопряженного с компьютером 10. Наличие данного электромеханического узла позволяет механизировать процесс подстройки угла конусности пучка, исключив грубые касания, искажающие оптическую схему.

Устройство может быть использовано для осуществления нелинейно-частотных преобразований лазерного излучения, для управления микро- и наночастицами, высоко разрешающей микроскопии, в системах обработки и передачи оптической информации, для неразрушающего оптического контроля качества цилиндрических и конических поверхностей, а также для прецизионной лазерной обработки материалов, в том числе металлов.

1. Yuichi Kozawa and Shunichi Sato. Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism. November 15 / Optics Letters. – Vol. 30. – No. 22. – 2005. P. 3063-3065.
2. Kazuhiro Yonezawa, Yuichi Kozawa, and Shunichi Sato. Generation of a radially polarized laser beam by use of the birefringence of a c-cut Nd:YVO4 crystal. July 15, 2006 / Vol. 31, No. 14 / Optics Letters, P. 2151-2153.
3. Khilo, N.A. A high-efficient method for generating radially and azimuthally polarized Bessel beams using biaxial crystals / N.A. Khilo, T.S.M. Al-Saud, S.H. Al-Khowaiter, M.K. Al-Muhanna, S.V. Solonevich, N.S. Kazak, A.A. Ryzhevich // Optics Communications. – 2012. – Vol. 285, № 24. – P. 4807-4810.

УДК 621.372.826

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ВЕКТОРНЫЙ ДАТЧИК ДЕФОРМАЦИЙ

Рябцев В.Н.<sup>1</sup>, Гончаренко И.А.<sup>1</sup>, Конойко А.И.<sup>2</sup>, Ильюшонок А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси  
Минск, Республика Беларусь

Для осуществления мониторинга состояния несущих конструкций зданий и сооружений предлагается оптический датчик на основе волоконно-оптических интерферометров. Датчик позволяет измерять как величину, так и направление и локализацию изгибов и напряжений исследуемых конструкций. Внедрив волоконно-оптические сенсоры в структуру сооружений, можно отслеживать изменение их состояния в

течение времени, собирая на центральном пункте слежения большое число непрерывных измерений. Использование оптических волокон в качестве чувствительных элементов позволяет создавать измерительные системы, обладающие малыми габаритами и весом; высокой механической прочностью; стойкостью к повышенным температурам, вибрациям и другим воздействиям окружающей среды; высокой скоростью