

УДК 53.01, 533.583.2

**ПРОСТОЙ ПОЗИЦИОНЕР
С НАНОМЕТРОВОЙ ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬЮ
ПОЛОЖЕНИЯ СФОКУСИРОВАННОГО
СВЕТОВОГО ЛУЧА НА ОБЪЕКТЕ***

С. Н. Атутов^{1,2}, А. С. Кучьянов¹, В. А. Сорокин^{1,2}, А. И. Плеханов¹

¹*Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1*

²*Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2
E-mail: aleks@iae.nsk.su*

Предложен и исследован простой позиционер, позволяющий фиксировать положение сфокусированного светового луча на объекте с нанометровой воспроизводимостью. Он может быть использован для позиционирования сфокусированного излучения (в частности лазерного) на поверхностях оптического волокна, биологических объектов, оптических дисков, плёночных модуляторов, в голографических системах памяти, для записи и считывания оптической информации и т. д. в диапазоне от микрон до нанометров.

Ключевые слова: позиционер, юстирование, воспроизводимость.

DOI: 10.15372/AUT20160110

Введение. Эффективность ввода излучения, например, в оптические световоды является главной характеристикой системы источник излучения — волокно, и от её значения зависит величина оптической мощности, которую можно ввести в световод. Кроме того, высокоточное позиционирование сфокусированного светового излучения на поверхности оптических дисков или в голографических системах памяти чрезвычайно важно для точного и помехоустойчивого считывания информации с оптических носителей [1].

Точное позиционирование сфокусированного излучения на входном торце волновода с размером порядка нескольких микрон или, например, на выбранном месте внутри биологической клетки является достаточно сложной задачей. Эта задача обычно выполняется с помощью разнообразных юстировочных устройств совмещения источников света с объектом. В настоящее время и в отечественной, и в зарубежной литературе имеется большое количество работ и изобретений, посвящённых описанию и исследованию устройств, позволяющих осуществить позиционирование сфокусированного светового излучения на различных объектах, в частности на входном торце световода [2]. Для решения задачи используется пространственный параллелограммный механизм с упруго соединёнными рычагами, в котором звено с подвижным основанием расположено относительно звена с неподвижным основанием с возможностью поступательного перемещения в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Авторы считают, что повышение точности позиционирования фокусирующей линзы в данном устройстве достигается устранением подвижных соединений в механической передаче между юстируемыми элементами и заменой трения скольжения в оптических столиках молекулярным трением упругости в параллелограммном механизме.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-29-08134).

Это решение только частично устраняет недостатки механических позиционеров. В описанном устройстве перемещение линзы относительно световода (или, наоборот, перемещение световода относительно линзы) происходит с помощью микрометрических винтовых механизмов, в которых неконтролируемые деформации плёнки масла, используемого для смазки трущихся поверхностей микровинтов, а также неизбежные люфты не позволяют осуществлять позиционирование сфокусированного лазерного излучения на торце волновода с точностью порядка 10 нм. Кроме того, наличие гистерезиса у микровинтов препятствует воспроизводимости позиционирования.

В [3] описан трёхкоординатный пьезоэлектрический позиционер. В этом устройстве объект позиционируется за счёт приложения электрического напряжения. Существенным недостатком такого устройства является то, что для его работы требуются непрерывное управляющее напряжение, а также, по крайней мере, три высоковольтных источника питания. Гистерезис используемых пьезоэлектрических элементов значительно затрудняет достижение необходимой воспроизводимости позиционирования.

Известно устройство для стыковки волоконного световода с излучателем, позволяющее осуществить позиционирование сфокусированного излучения на входном торце волновода [4]. В этой работе решение проблемы фокусировки состоит в малых перемещениях фокусирующей линзы (или торца световода) в двух направлениях поперёк лазерного луча с помощью прецизионных микровинтов.

Недостатком представленного технического решения является то, что такая точность для механических позиционеров трудно достижима из-за неизбежного люфта в направляющих оптических столиках, на которых закреплена фокусирующая линза или волокно. На относительное расположение юстируемых оптических элементов влияют трение, износ и погрешности изготовления подвижных деталей, участвующих в передаче движения между элементами. Кроме того, наличие гистерезиса у микровинтов делает почти невозможным многократное попадание сфокусированного света на заранее выбранную точку.

Во всех вышерассмотренных устройствах неконтролируемые изменения позиционирования соизмеримы с их точностью.

Целью данной работы является экспериментальное и теоретическое определение возможной точности и воспроизводимости позиционирования излучения предложенным устройством.

Принципы работы позиционера. Поставленная задача решается выбором оптической схемы устройства (рис. 1). Основными элементами, определяющими точность, воспроизводимость и широкий диапазон позиционирования, являются дополнительная к основной короткофокусной линзе 2 длиннофокусная линза 4 и плоскопараллельная пластинка 3, помещённая между ними. Расстояние между линзами много больше фокусного расстояния линзы 2. Плоскопараллельная пластинка выполнена вращающейся вокруг двух взаимно перпендикулярных осей.

На неподвижной платформе 5 размещено звено с объектом позиционирования с подвижным основанием 1 в трёх взаимно перпендикулярных направлениях. Точное параллельное перемещение фокуса луча электромагнитного излучения осуществляется с помощью поворота плоскопараллельной пластинки, выполненной прозрачной для электромагнитного излучения. Процесс позиционирования начинается с предварительного совмещения объекта с помощью подвижного основания с осью луча электромагнитного излучения. После этого все элементы устройства фиксируются. Затем поворотом пластинки производится окончательная и точная юстировка положения луча электромагнитного излучения. При повороте плоскопараллельной пластинки (вокруг какой-либо из осей) происходит параллельное смещение луча, а также смещение первого диска Эйри, сформированного линзой 4, поперёк направления распространения луча. Это, в свою очередь, приводит к малым смещениям второго диска на поверхности оптического объекта, если расстояние между

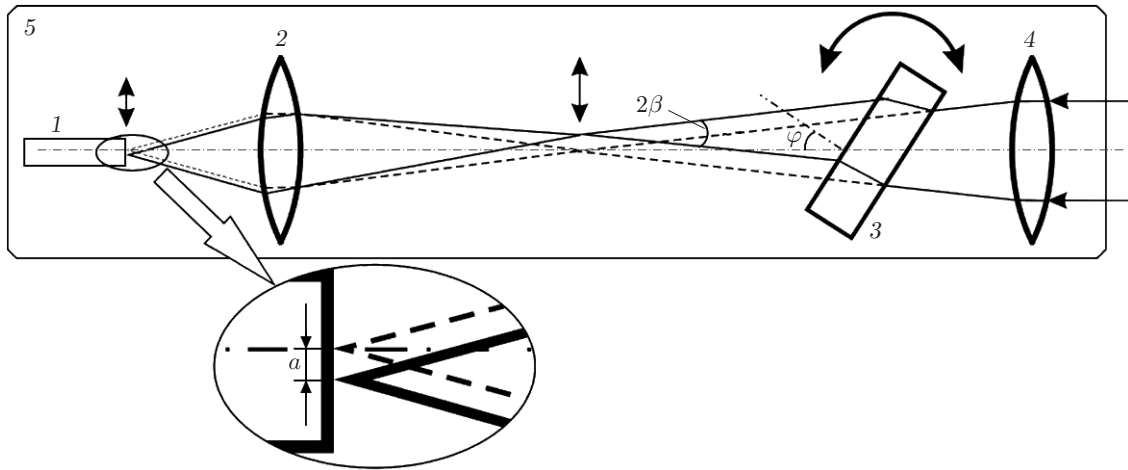


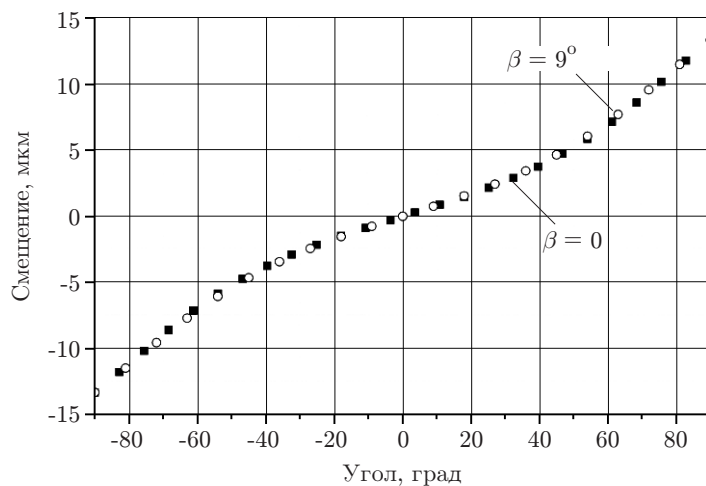
Рис. 1. Оптическая схема позиционера

линзами много больше фокусного расстояния линзы 2. Зависимость величины смещения a сфокусированного излучения от угла поворота φ пластинки определяется выражением

$$a = d \left\{ \sin \varphi - \frac{1}{4 \cos \beta} \left[\frac{\sin 2(\varphi - \beta)}{\sqrt{n^2 - \sin^2(\varphi - \beta)}} + \frac{\sin 2(\varphi + \beta)}{\sqrt{n^2 - \sin^2(\varphi + \beta)}} \right] \right\} K, \quad (1)$$

где d , φ , n — толщина, угол поворота и показатель преломления плоскопараллельной пластинки соответственно; 2β — угол сходимости пучка после фокусирующей линзы 4; K — поперечное уменьшение линзы 2. График зависимости $a(\varphi)$ представлен на рис. 2.

Формула (1) справедлива для лучей электромагнитного излучения, распространяющихся в тонком конусе с углом при вершине 2β (см. рис. 1). Зависимость a от β приводит к искажениям формы первого диска Эйри. Однако, когда $2\beta < 1$, эти искажения практически устраняются. При диаметре лазерного луча 5 мм на линзе 4 и фокусном расстоянии $F_4 = 150$ мм угол $\beta < 0,017$ рад. В этом случае формула (1) может быть разложена в ряд

Рис. 2. Зависимость величины смещения a сфокусированного излучения от угла поворота φ плоскопараллельной пластинки

Тейлора по малому параметру β :

$$a = K \left\{ d \left(\sin \varphi - \frac{1}{2} \frac{\sin 2\varphi}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi}} \right) + d\beta^2 \frac{3}{4} \frac{\sin 2\varphi}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi}} \left[1 - \frac{\cos 2\varphi}{n^2 - \sin^2 \varphi} - \frac{1}{4} \frac{\sin^2 2\varphi}{(n^2 - \sin^2 \varphi)^2} \right] \right\}. \quad (2)$$

Второе слагаемое в (2) определяет величину искажений первого диска Эйри. Максимальные искажения будут наблюдаться при $\varphi \approx 0,84$ рад, и их величина будет менее $1,5 \cdot 10^{-4}$ от толщины плоскопараллельной пластинки 3 (для $n = 1,52$). При толщине плоскопараллельной пластинки 10 мм искажения намного меньше размера первого диска Эйри и ими можно пренебречь.

Из соотношения (1) видно, что область перемещения сфокусированного пятна прямо пропорциональна толщине d плоскопараллельной пластинки. Поэтому легко осуществить широкий диапазон перемещения, поместив не одну, а несколько независимых пластинок разной толщины. В предлагаемом нами устройстве фокусное расстояние линзы 2 выбиралось равным 2 мм, а линза 4 имела фокусное расстояние 150 мм. Линзы располагались на расстоянии 300 мм друг от друга. В этой конфигурации линза 4 с учётом расходимости лазерного электромагнитного излучения формировала первый диск Эйри с диаметром 60 мкм, а звено с подвижным основанием отображало этот диск на поверхности объекта с уменьшением в 75 раз ($K \approx 2$ мм/150 мм) в фокус с меньшим диаметром (порядка 0,8 мкм).

При повороте пластинки в общем случае также должно наблюдаться смещение первого диска Эйри вдоль оптической оси. Покажем, что этим смещением можно пренебречь. Общее выражение для смещения первого диска Эйри вдоль оптической оси имеет вид

$$\Delta z = d \left\{ -\cos \varphi + \frac{1}{4 \cos \beta} \left[\frac{\sin 2(\varphi - \beta)}{\sqrt{n^2 - \sin^2(\varphi - \beta)}} - \frac{\sin 2(\varphi + \beta)}{\sqrt{n^2 - \sin^2(\varphi + \beta)}} \right] \right\}. \quad (3)$$

Его разложение в ряд Тейлора по малому параметру β запишем как

$$\Delta z \approx d \left\{ -\cos \varphi - \frac{1}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi}} \left[\frac{\sin^2 2\varphi}{4(n^2 - \sin^2 \varphi)} + \cos 2\varphi \right] \right\}. \quad (4)$$

Величина $-1,7d < \Delta z < 0,85d$ есть продольное смещение положения первого диска Эйри, образованного линзой 4 при изменении угла φ от $\pi/2$ до $-\pi/2$. Фокусирующая линза 2, работая с уменьшением в 75 раз, даст величину продольного смещения, равную по модулю квадрату поперечного, соответственно Δz после линзы 2 станет меньше микрона (для $d = 10$ мм).

Предложенное устройство не чувствительно к смещению плоскопараллельной пластинки параллельно самой себе. Влияние же угловых люфтов подвеса сводится к минимуму. Это видно на графике, приведённом на рис. 2. Действительно, для того чтобы сместить сфокусированное пятно на 9 мкм при выбранных параметрах пластинки ($d = 1$ мм, $n = 1,52$), необходим её поворот на 76° . Даже если величина угловых люфтов в поворотном механизме довольно большая ($0,1-1^\circ$), то такой люфт вызывает смещение фокуса на объекте позиционирования лишь на величину $\sim (0,01-0,1)$ мкм. Поэтому предельная точность предложенного устройства, которая может быть достигнута после устранения влияния турбулентности воздуха и вибраций механических деталей, в позиционировании

положения сфокусированного электромагнитного излучения на плоскости торца оптоволоконного конца очень высока. Выбирая толщину плоскопараллельной пластинки, можно добиться желаемой точности в перемещении лазерного фокуса на поверхности объекта. Оснащение нанопозиционера дополнительными плоскопараллельными пластинками разной толщины позволяет расширить диапазон позиционирования при сохранении заявляемой точности.

Экспериментальные результаты точности позиционирования. Измерения показали, что при толщине плоскопараллельной пластинки 7 мм и максимальном угле поворота порядка $\pm 15^\circ$ смещение первого сфокусированного пятна поперёк луча электромагнитного излучения было ± 500 мкм, что, в свою очередь, приводило к малому смещению второго пятна на величину порядка ± 8 мкм.

Точность и воспроизводимость положения сфокусированного лазерного излучения проверялись нами на модельном эксперименте по измерению амплитуды медленных и быстрых вариаций интенсивности света, прошедшего через малое отверстие в металлической плёнке с внутренним диаметром 1,7 мкм. В эксперименте использовалось излучение гелий-неонового лазера с длиной волны 0,63 мкм.

На рис. 3 представлен пример временной записи интенсивности света, прошедшего через отверстие. С помощью поворота пластинки на угол 45° свет трижды выводился из этого отверстия, что отвечает трём минимумам, представленным на фигуре. При возвращении пластинки в исходное положение сигнал фотодетектора восстанавливался до среднего максимального значения. Согласно нашим измерениям неопределённость положения фокуса на отверстии для данного устройства (которая отвечает шумам сигнала в максимуме) составила величину порядка 10 нм. Такая величина была оценена исходя из измеренной неопределённости положения луча света по углу (из-за турбулентности воздуха, вибрации лазерных зеркал и проч.). Воспроизводимость положения фокуса порядка 10 нм оценивалась из равенства средних максимумов интенсивности света. Эта величина много меньше, чем диаметр сфокусированного луча электромагнитного излучения (~ 1 мкм), и вполне достаточна для многих практических приложений данного устройства.

Преимуществом заявленного широкодиапазонного нанопозиционера сфокусированного электромагнитного излучения является возможность воспроизводимого пространственно-

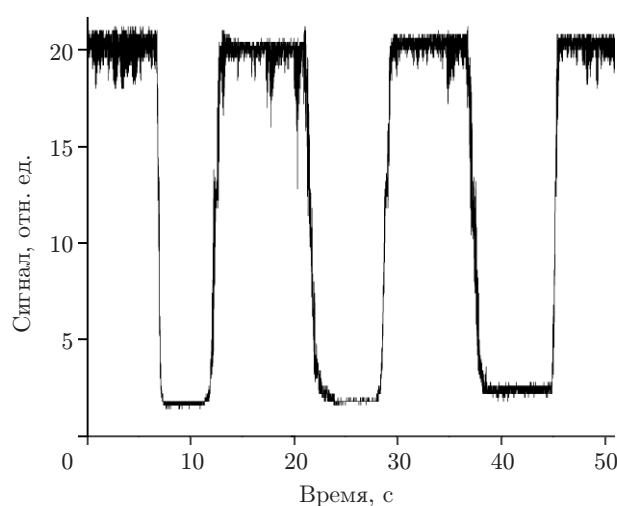


Рис. 3. Демонстрация воспроизводимости позиционера путём регистрации интенсивности света, прошедшего через отверстие диаметром ~ 1 мкм. Минимумы соответствуют перемещению сфокусированного излучения за пределы отверстия поворотом пластинки. Максимумы отвечают позиционированию сфокусированного излучения точно на отверстии возвращением пластинки в исходное положение

го позиционирования в диапазоне от микрон до нанометров при максимальном устранении влияния различного рода паразитных люфтов. Устройство может быть использовано для сканирования луча записи, считывания оптической информации и возвращения луча в заданную точку с нанометровой точностью. Следует отметить, что устройство очень простое в изготовлении и удобно в применении в реальных лабораторных условиях.

Заключение. В данной работе предложена оригинальная оптическая схема, обеспечивающая пространственное перемещение светового луча. Для созданного на этой базе устройства экспериментально и теоретически доказана возможность достижения нанометровой точности и воспроизводимости позиционирования в широком диапазоне перемещений (~ 1 см) при пренебрежимо малом влиянии люфтов. Экспериментально продемонстрировано функционирование предложенного устройства и подтверждена его практическая значимость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Микерин С. Л., Угожаев В. Д. Перестраиваемый голографический интерферометр со светоделительным блоком и неподвижными зеркалами // Автометрия. 2014. **50**, № 2. С. 110–120.
2. Пат. 2029325 РФ. Юстировочное устройство /В. М. Смирнов. Опубл. 20.02.1995.
3. Пат. 2297078 РФ. Позиционер трехкоординатный /В. А. Быков, А. О. Голубок, В. В. Котов, И. Д. Сапожников. Опубл. 10.04.2007; Бюл. № 10.
4. Pat. 5136433 US. Optical positioner and connector /W. E. Durell. Publ. 04.08.1992.

Поступила в редакцию 31 марта 2015 г.
