

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА Y-КООРДИНАТЫ ДЛЯ КРУГОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЗАПИСЫВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Руслан Владимирович Шиманский

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, младший научный сотрудник, тел. (383)333-30-91, e-mail: shimansky@iae.nsk.su

Виктор Павлович Корольков

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, доктор технических наук, зав. лабораторией дифракционной оптики, тел. (383)333-30-91, e-mail: victork@iae.nsk.ru

Антон Евгеньевич Качкин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер-программист, тел. (383)333-30-91, e-mail: anton.kachkin@yandex.ru

В работе приводятся результаты разработки и исследования прецизионного пьезоэлектрического привода Y-координаты для круговой лазерной записывающей системы. Разрабатываемый привод предназначен для коррекции направления траектории линейного сканирования записывающего пучка для совмещения ее с центром вращения подложки.

Ключевые слова: круговая лазерная записывающая система, траектория сканирования, пьезоэлектрический привод, погрешность позиционирования, оптический энкодер, дифракционные оптические элементы.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A PRECISION PIEZOELECTRIC Y-COORDINATE DRIVE FOR A CIRCULAR LASER WRITING SYSTEM

Ruslan V. Shimansky

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptuyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, phone: (383)333-30-91, e-mail: shimansky@iae.nsk.su

Victor P. Korolkov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptuyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Head of Laboratory of Diffraction Optics, phone: (383)333-30-91, e-mail: victork@iae.nsk.ru

Anton E. Kachkin

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptuyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer-Programmer, phone: (383)333-30-91, e-mail: anton.kachkin@yandex.ru

The paper presents the results of the development and research of a precision piezoelectric Y-coordinate drive for a circular laser writing system. The developed drive is designed to correct the direction of the linear scan path of the recording beam to align it with the center of rotation of the substrate.

Key words: circular laser writing system, scanning trajectory, piezoelectric drive, positioning error, optical encoder, diffractive optical elements.

Введение

Для синтеза дифракционных оптических элементов наиболее эффективным и гибким инструментом оказались круговые лазерные записывающие системы (КЛЗС) [1–4]. Они основаны на локальном экспонировании подложки с регистрирующим материалом путем непрерывного ее вращения и пошагового перемещения сфокусированного лазерного пучка вдоль радиуса. Однако в связи с несовершенством механических компонентов системы двухкоординатного сканирования КЛЗС, актуальной является задача разработки специальных процедур коррекции направления траектории линейного сканирования записывающего пучка для совмещения ее с центром вращения подложки [5]. В настоящее время на литографической системе CLWS-300IAE [6], разработанной в ИАиЭ СО РАН, используется моторизованный привод поворота зеркала, направляющего коллимированный лазерный пучок в фокусирующий объектив. Поворот зеркала приводит к смещению сфокусированного пучка в направлении (Y-координата) перпендикулярному направлению перемещения радиальной координаты КЛЗС. Привод зеркала реализован на рычажном механизме и актюатором-микровинтом с шаговым двигателем. Недостатком этой системы является большой люфт, вносящий невоспроизводимость перемещения при одинаковом количестве шагов двигателя. В настоящей работе исследована возможность применения пьезопривода для построения системы прецизионного смещения траектории радиального сканирования пучка в КЛЗС с целью повышения быстродействия и снижения погрешности нанопозиционирования.

1. Новая Y-координата

За последние 20 лет развития круговой лазерной записывающей системы (КЛЗС) было разработано и внедрено несколько вариантов подсистемы Y-координаты. Хорошо себя зарекомендовала система с поворотным зеркалом, которая на данный момент используется в составе лабораторной CLWS-300IAE. Используемая подсистема позволяет производить совмещение центра системы позиционирования по Y координате с центром вращения оптической заготовки с погрешностью не более 0,5 мкм. Основными недостатками данной реализации являются отсутствие обратной связи в системе позиционирования, наличие гистерезиса, достигающего 1–1,5 мкм, медленная скорость перемещения в заданное положение, недостаточная точность позиционирования и качество механических элементов системы. Для устранения этих недостатков нами была предложена новая версия Y-координаты.

За основу нового привода была взята уже отработанная базовая схема с поворотным зеркалом. В схему был добавлен пьезодвигатель управляемый контроллером с обратной связью с применением датчика линейного перемещения. На рис. 1 изображена принципиальная схема новой Y-координаты.

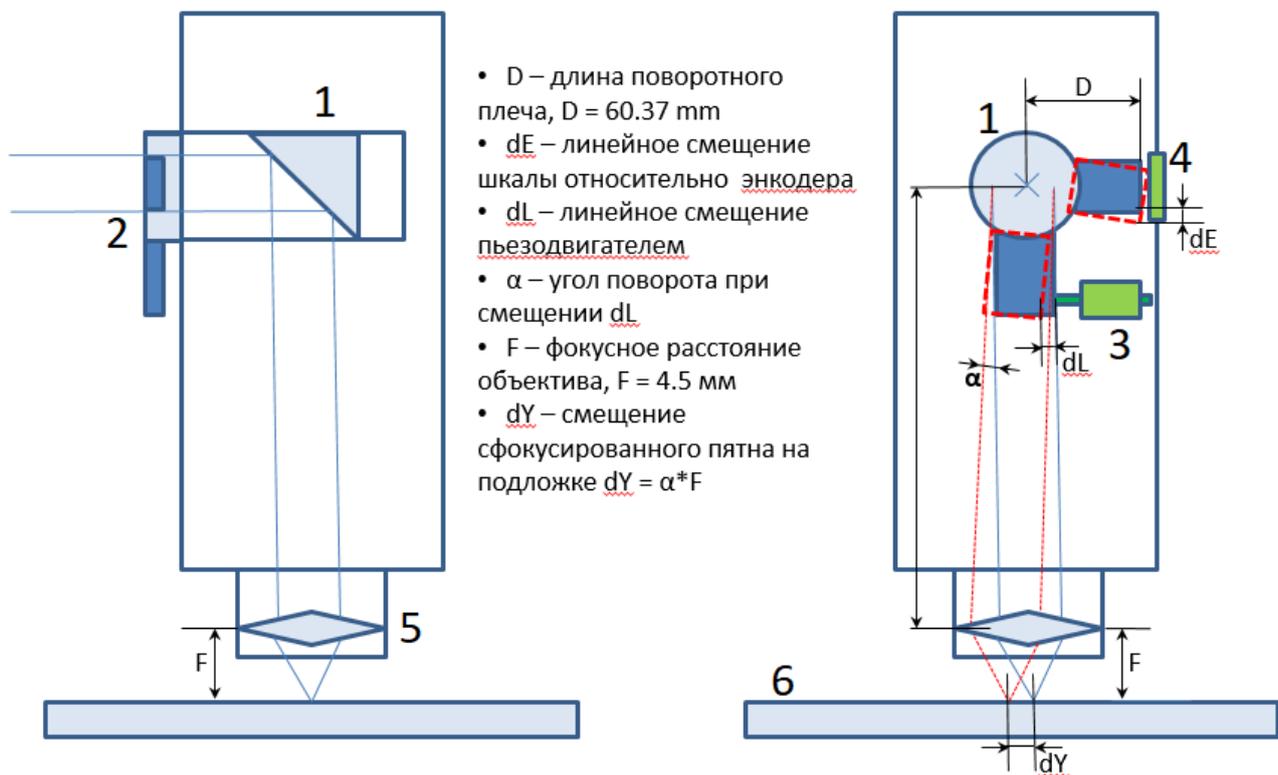


Рис. 1. Принципиальная схема работы Y-координаты

Зеркало 1 оптического канала размещено на поворотном механизме 2, который закреплен во входном канале колонны автофокуса. Поворотный механизм вращается вокруг центра входного отверстия оптического канала с использованием пьезодвигателя 3. Контроль и обратная связь перемещения подвижки осуществляется закрепленным на колонне автофокуса датчиком линейного перемещения 4. При повороте механизма на заданный угол записывающий пучок смещается 5 на определенное расстояние на оптической заготовке 6. Для управления подвижкой было решено использовать линейный пьезодвигатель PiezoLEGS 6N под управлением контроллера Piezo LEG PMD301 фирмы PiezoMotor. В качестве датчика перемещения обратной связи было предложено использовать энкодер TONIC TI20KDA01A фирмы Renishaw.

2. Экспериментальный стенд и его характеристики

Для исследования характеристик новой Y-координаты был собран экспериментальный стенд с использованием предложенного оборудования.

На рис. 2 приведена фотография общего вида поворотного механизма, расположения пьезодвигателя, энкодера и контроллера управления. Были проведены настройка и оптимизация работы контроллера для получения максимальной точности позиционирования с минимизацией времени стабилизации заданного положения позиционера.



Рис. 2. Общий вид экспериментального стенда Y-координаты

В таблице приведены расчетные и экспериментально полученные характеристики стенда.

Макс. скорость шкалы относительно энкодера (производитель)	0.8 mm/s = 800 μ m/s	Ограничение связано с выходной частотой
Макс. скорость перемещения пьезодвигателя (расчетная)	100 wfm/s	wfm-step = 5 μ m \pm 3 μ m Макс. скорость задается в wfm-steps/s 1 wfm/s = 5 μ m/s [2 μ m/s, 8 μ m/s] 800/5 = 160 wfm/s [400, 100] (выбираем 100 wfm/s как минимальную)
Макс. скорость в μ m (эксперимент)	400–480 μ m/s	В зависимости от нагрузки
SPC – Steps per count (расчетная)	56	Расчетный 56 (>60 резонанс)
Коэффициент пересчета enc \rightarrow μ m	0.00095	1 μ m \approx 1052.632 enc
RMS, PV удержания (эксперимент)	\approx 0.0060 μ m; \approx 0.0275 μ m	При Deadband 25 enc
Скорость сканирования 5 μ m (эксп.)	3–4 сек	При шаге 0.05 μ m; Deadband 25 enc
Угловое разрешение (расчетная)	0.003245843 сек	1.57363E-08 rad
Угловая точность при \pm 25 enc	0.16229217 сек	7.86815E-07 rad
Разрешение перемещения сфокусированного пятна по Y	0.070813 nm	Текущая версия 14 nm
Пространственное разрешение позиционирования \pm 25 enc	3.540666 nm	При F = 4.5 мм

Экспериментально было подтверждено разрешение новой координаты в два раза лучше старой версии с учетом размеров колонны автофокуса CLWS-300IAE. Также экспериментально была получена точность позиционирования на порядок лучше используемой в настоящее время Y-координаты. Скорость сканирования увеличилась примерно в 2–3 раза.

3. Экспериментальные результаты стенда

Для исследования динамических характеристик экспериментального стенда было использовано управляющее программное обеспечение КЛЗС CLWSCP версии 4.0 с интегрированным в него управлением контроллера PMD301. Было проведено несколько тестов на перемещение координаты на короткие и дальние расстояния, удержание координаты, повторяемость перемещения.

На рис. 3 приведена диаграмма перемещения на расстояния 1 000 мкм. Средняя скорость перемещения составила 450 мкм/с, что соответствует заявленным требованиям. На диаграмме можно наглядно увидеть разницу хода пьезодвигателя под нагрузкой и без, что является нормой для таких типов двигателей. Так, под нагрузкой скорость снижается на 5–15 % по причине особенностей конструкции пьезодвигателя [7].

На рис. 4 приведен пример нескольких диаграмм удержания заданного положения подвижки при различных параметрах SPC (Steps per count). Данный параметр задает среднее количество микрошагов двигателя на 1 отсчет энкодера и является одним из основных параметров алгоритма управления контроллера. По результатам тестов было определено оптимальное значение SPC примерно 40, при котором было достигнуто удержание на уровне $RMS = 5.8$ нм; $PV = 27.5$ нм, что является очень хорошим результатом. Также по результатам тестов определено, что резонанс подвижки возникает при значениях $SPC > 60$.

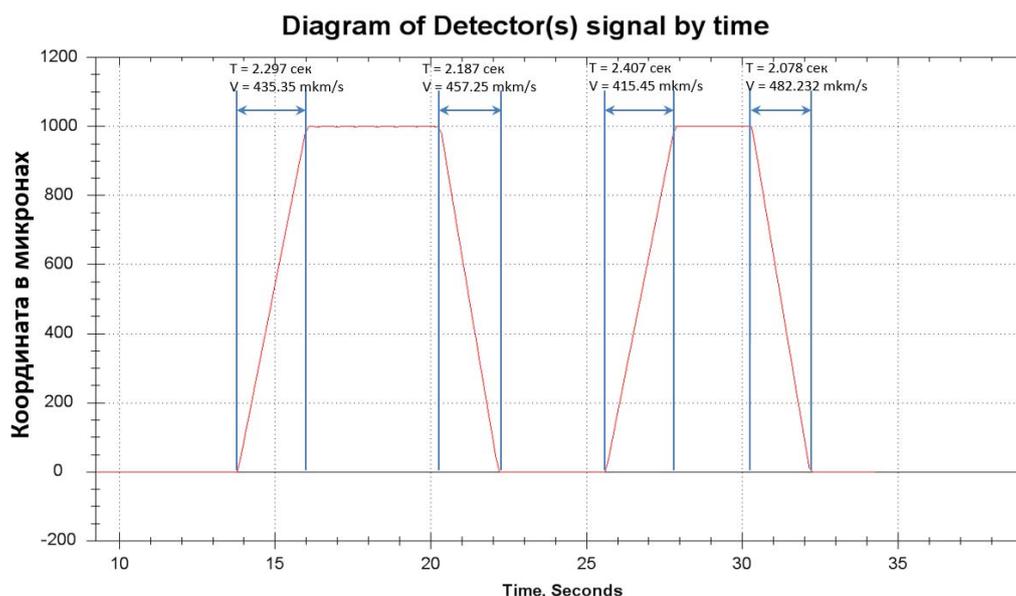


Рис. 3. Диаграмма перемещения $\pm 1\ 000$ мкм (max speed = 100 wfm)

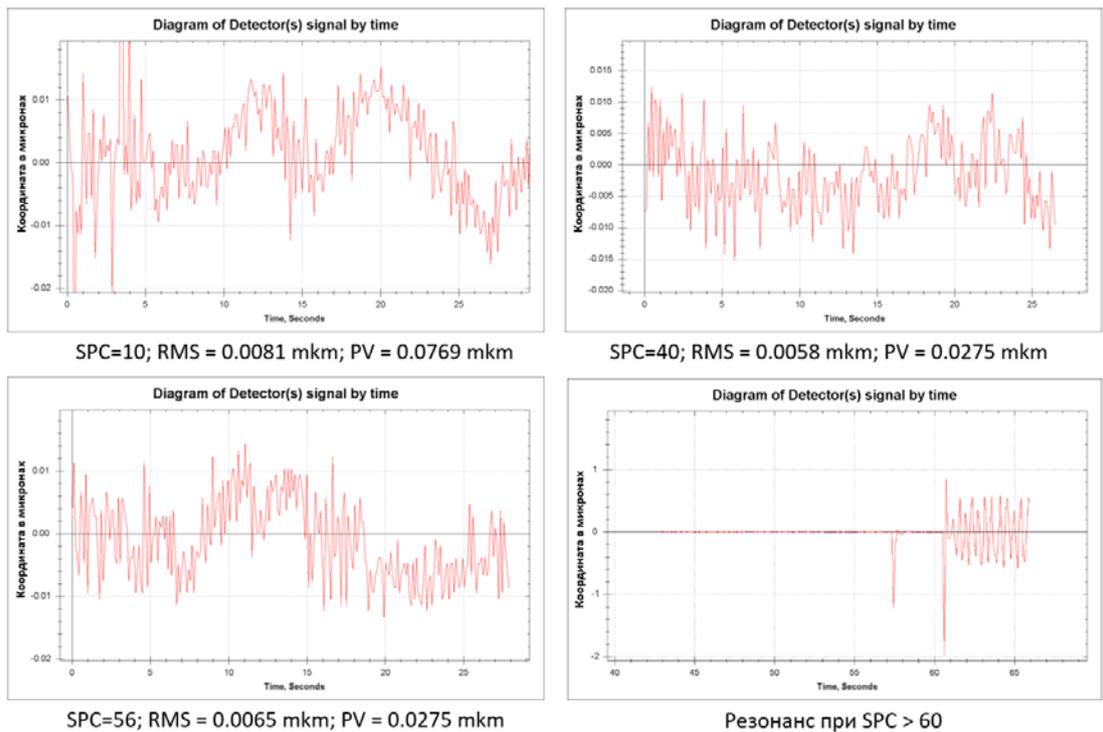


Рис. 4. Диаграммы удержания заданной координаты при разных параметрах SPC

На рис. 5 приведены диаграммы перемещения на малые расстояния при значении SPC = 30.

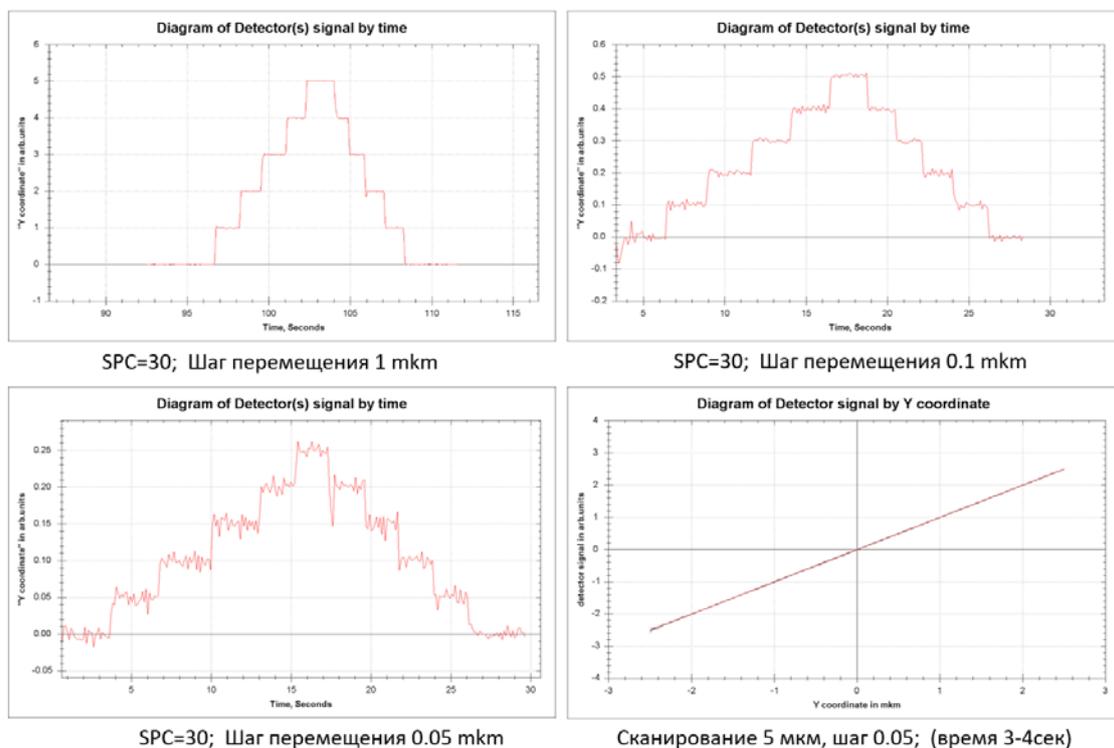


Рис. 5. Диаграммы перемещения на малые дистанции

На рис. 5 также приведен пример повторяемости сканирования малого диапазона 5 мкм с шагом 0,5 мкм. Результаты тестов подтвердили предварительные расчеты. Время перемещения на малые дистанции в режиме замкнутой петли не превышает 0.1 с., сканирование диапазона 5 мкм с шагом 0,5 мкм не превышает 3–4 с, что примерно в 2-3 раза быстрее, чем используемый привод Y-координаты. Точность позиционирования с замкнутой петлей обратной связи минимум в 10 раз лучше предыдущей координаты. Повторяемость траектории сканирования $PV = 35,7$ нм, $RMS = 9$ нм, что соответствует заявленным требованиям.

Заключение

Разработан и исследован прецизионный пьезоэлектрический привод Y-координаты для круговой лазерной записывающей системы, обеспечивающий перемещение записывающего пятна в пределах ± 25 мкм перпендикулярно радиальной (X) координате на КЛЗС. Собран экспериментальный стенд, реализующий предложенную схему Y-координаты с использованием линейного пьезодвигателя PiezoLEGS 6N под управлением контроллера Piezo LEG PMD301 фирмы PiezoMotor. В качестве датчика перемещения обратной связи использовался энкодер TONIC TI20KDA01A фирмы Renishaw. Результаты тестов показали увеличение точности позиционирования более чем в 10 раз, скорости сканирования примерно в 2–3 раза в сравнении с используемой в данный момент Y-координаты на CLWS-300IAE. По результатам проведенных тестов на экспериментальном стенде можно сделать вывод – внедрение новой координаты в КЛЗС позволит увеличить точность позиционирования записывающего пятна по Y координате до 25–50 нм при увеличении скорости сканирования в примерно в 2–3 раза. Также данная система позволит осуществлять динамическую коррекцию записи ДОЭ по Y координате в процессе записи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 3D лазерные информационные технологии / отв. ред. П. Е. Твердохлеб. – Новосибирск, 2003. – 550 с.
2. Goltsov W. and Liu S. Polar Coordinate laser writer for binary optics fabrication // Proc. SPIE. – 1990. – Vol. 1211. – P. 137.
3. Bowen J. P., Michaels R. L., Blough C. G. Generation of large-diameter diffractive elements with laser pattern generation // Appl. Optics. – 1997. – Vol. 36, № 34. – P. 8970–8975.
4. Kim D.-I., Rhee H.-G., Kim G.-H. Performance evaluation of direct laser lithographic system for rotationally symmetric diffractive optical elements // Proc. SPIE. – 2012. – Vol. 8249. – 82491C.
5. Шиманский Р. В., Полещук А. Г., Корольков В. П., Черкашин В. В. Совмещение записывающего пучка с осью вращения дифракционной структуры при изготовлении ДОЭ в полярной системе координат // Автометрия. – 2017. – 53, № 2. – С. 30–38.
6. Poleshchuk A. G., Churin E. G., Koronkevich V. P., Korolkov V. P., etc. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // Appl. Opt., 38, pp. 1295–1301 (1999).
7. Marco Silvestri, Matteo Confalonieri, Andrea Ferrario. Piezoelectric actuators for micro positioning stages in automated machines: experimental characterization of open loop implementations // FME Transactions 45(3): pp. 331–338.

© Р. В. Шиманский, В. П. Корольков, А. Е. Качкин, 2019