

# Измерение характеристик тонких пленок оптическим датчиком на основе спиральной зонной пластины

*Е. С. Козлова<sup>1,2</sup>, А. Г. Налимов<sup>1,2</sup>, В. В. Котляр<sup>1,2</sup>, С. С. Стафеев<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН; Молодогвардейская, 151, Самара, 443001, Россия

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет; Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

Предложены методика и оптический датчик для бесконтактного определения малых смещений, толщин тонких пленок, их показателей преломления и углов наклона. Датчик состоит из источника лазерного излучения, амплитудной спиральной зонной пластинки третьего порядка с высокой числовой апертурой и ПЗС-камеры, соединенной с компьютером. Измеряя угол поворота трехлепесткового распределения интенсивности, можно измерить: минимальный сдвиг вдоль оптической оси около 7 нм (длина волны 532 нм), изменение толщины пластины на 3 нм, изменение наклона угла пластины на 0,1 градуса, а изменение показателя преломления на 0,01.

*Ключевые слова:* Спиральная зонная пластинка, Датчик толщины, Датчик перемещения, Метод FDTD, СБОМ.

*Цитирование:* Козлова, Е. С. Измерение характеристик тонких пленок оптическим датчиком на основе спиральной зонной пластины / Е. С. Козлова, А. Г. Налимов, В. В. Котляр, С. С. Стафеев // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 247–249.

## Введение

Вращающиеся лазерные лучи, содержащие двухлепестковое распределение интенсивности, давно используются для увеличения продольного разрешения в оптических микроскопах. Двухлепестковая функция рассеяния точки позволяет определять трехмерное положение отдельной молекулы или квантовой точки с точностью 10–20 нм [1]. В этих работах вращающийся луч был создан с помощью модулятора света. С целью миниатюризации оптического датчика в нашей работе предлагается использовать микроэлемент в виде спиральной бинарной амплитудной зонной пластины третьего порядка с высокой числовой апертурой и размером всего 8x8 мкм, выполненной в тонкой алюминиевой пленке толщиной 60 нм.

## Результаты исследования

В данной работе рассматривается трехлепестковый вращающийся лазерный пучок, сформированный с помощью спиральной зонной пластины (ЗП) третьего порядка. В пучке, прошедшем ЗП, формируются три локальных максимума интенсивности. Если ЗП сместить вдоль оптической оси, то эти три локальных максимума интенсивности будут вращаться вокруг оптической оси. Если измерить угол поворота трехлепесткового распределения интенсивности с помощью ПЗС-камеры, то мы сможем определить сдвиг ЗП. Поместив между ПЗС-камерой и ЗП тонкую пленку, можно определить ее толщину путем измерения угла

поворота трехлепесткового луча. Смещая пленку поперек оптической оси, можно измерить микрорельеф пленки по сечению, измеряя угол поворота трехлепесткового луча. Если между ЗП и ПЗС-камерой поместить тонкую кювету с жидкостью, то, используя угол поворота трехлепесткового луча, можно определить показатель преломления жидкости. Кроме того, если тонкую пластину, помещенную между ЗП и ПЗС-камерой, наклонить на небольшой угол вокруг оси, перпендикулярной оптической оси, то этот угол наклона можно оценить по углу поворота трехлепесткового пучка.

### **Заключение**

На основе метода FDTD разработана методология простого оптического датчика на базе ЗП третьего порядка, позволяющего оценивать сразу несколько параметров: сдвиг, профиль толщины или рельефа, угол наклона и показатель преломления. Показано, что смещение выходной плоскости примерно на 2 мкм от поверхности ЗП приводит к почти линейному повороту трехлепесткового пучка примерно на  $260^\circ$ . Достигнутая угловая скорость вращения  $130$  град/мкм более чем в 2 раза выше, чем в аналогичных работах [1, 2]. Показано, что если между ЗП и ПЗС-камерой поместить тонкую пленку толщиной от  $200$  нм до  $1400$  нм, то изменение толщины пленки можно оценить по углу поворота трехлепестковой картины интенсивности с точностью до  $35$  нм, минимальное обнаруживаемое изменение толщины пленки составляет  $3$  нм. Показано, что этот оптический датчик позволяет оценить показатель преломления тонких пленок, если известна их толщина. При этом точность определения показателя преломления составляет  $0,019$ . Он также может измерять угол наклона  $\alpha$  на несколько градусов тонкой прозрачной пленки. В этом случае точность составляет около  $0,1^\circ$ .

### **Благодарность**

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда грант № 23-12-00236.

### **Список источников**

- [1] **Backlund, M. P.** The double-helix point spread function enables precise and accurate measurement of 3D single-molecule localization and orientation / M. P. Backlund, M. D. Lew, A. S. Backer, S. J. Sahl, G. Grover, A. Agrawal, R. Piestun, W. E. Moerner // SPIE Conference Proceeding - 2013. - Vol. 8590. - P. 85900L.
- [2] **Pavani, S.R.P.** High-efficiency rotating point spread functions / S.R.P. Pavani, R. Piestun // Opt. Express. - 2008. - Vol. 16. - № 5ю - P. 3484-3489.

# Measurement of the thin films characteristics by the optical sensor based on a spiral zone plate

*E. S. Kozlova<sup>1,2</sup>, A. G. Nalimov<sup>1,2</sup>, V. V. Kotlyar<sup>1,2</sup>, S. S. Stafeev<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Institute of Image Processing Systems RAS - branch of the Federal Research Center «Crystallography and Photonics» RAS; Molodogvardeiskaya, 151, Samara, 443001, Russia

<sup>2</sup> Samara National Research University; Russia, 443086, Samara, Moscow highway, 34

A technique and an optical sensor for non-contact determination of small displacements, thicknesses of thin films, their refractive indices and tilt angles are proposed. The sensor consists of a laser, a third- or second-order amplitude spiral zone plate with a high numerical aperture, and a CCD camera connected to a computer. By angle rotation measuring of the three-lobe intensity distribution the next parameters can be estimated: a minimum shift along the optical axis of about 7 nm (wavelength 532 nm), a change in plate thickness by 3 nm, a change in the tilt of the plate angle by 0.1 degrees, and a change in refractive index by 0.01.

*Keywords:* Spiral zone plate, Thickness sensor, Displacement sensor, FDTD method, SNOM.