

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЕНСОРА ДЕФОРМАЦИЙ НА ОСНОВЕ ГИБКИХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК ОТ ЕГО ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ОСВЕТИТЕЛЯ**

**Васильев М.Д.<sup>1</sup>, Ершов С.В.<sup>1</sup>**

**Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент Синева Д.А.<sup>1</sup>**

**Научный консультант - кандидат технических наук Москвин М.К.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Университет ИТМО

mdvasilev@itmo.ru

Исследование выполнено в рамках темы НИР магистрантов и аспирантов №624128 «Исследование оптических, механических и тензометрических свойств гибких прозрачных дифракционных оптических элементов на основе лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур». Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №24-79-10230 «Исследование и разработка методов цветной лазерной маркировки прозрачных материалов».

### **Введение**

В настоящее время наблюдается активное развитие и внедрение робототехнических систем и устройств носимой электроники в повседневную жизнь человека. Эти направления требуют активного развития датчиков контроля механических напряжений и деформаций, способных быстро и точно отслеживать положение устройства или организма [1,2]. Существующие датчики основаны на методах измерения динамических характеристик электрических цепей и спектральных свойств оптических элементов [2,3]. Однако такие способы имеют ряд недостатков, вызванных влиянием шумовых эффектов на точность измерений [4]. Имеющиеся способы улучшения качества измерений приводят к значительному удорожанию оборудования и ограничениям применений. Решением этих проблем может стать подход к измерению деформаций, основанный на применении гибких механочувствительных сенсоров на основе дифракционных решеток с заданными механическими и оптическими свойствами. Для создания решеток с управляемой топологией рельефа перспективными представляются лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры (ЛИППС). Такой тип структур является периодическим рельефом, формирующимся при воздействии линейно поляризованного лазерного излучения на материал. Отличительной особенностью ЛИППС является период структуры, соизмеримый с длиной волны излучения. Кроме того, при формировании ЛИППС существует возможность управления ориентацией решетки вращением вектора поляризации, а также периодом структуры изменением угла падения излучения. ЛИППС представляются выгодной альтернативой классическим методам производства дифракционных решеток ввиду простоты методов генерации рельефа и возможности подстройки оптических и геометрических характеристик для решения требуемых задач. В связи с этим представляется интерес к рассмотрению поверхностей, структурированных ЛИППС, в качестве рельефа мастер-матрицы для переноса на гибкие и эластичные материалы методом импринт-литографии.

### **Основная часть**

В настоящей работе предложен подход к созданию сенсоров деформаций, представляющих собой гибкие дифракционные элементы на основе ЛИППС, методом

импринт-литографии. ЛИППС являются дифракционными решетками с синусоидальным профилем поверхности и имеют соответствующие оптические свойства, хорошо согласующиеся с представлениями о дифракционных свойствах периодических рельефов. Это позволяет предположить, что элементы будут изменять свои свойства при деформации в соответствии с формулами дифракционной оптики.

В настоящей работе показана возможность использования ЛИППС, сформированных на стали AISI304, в качестве мастер-матриц для структурирования силиконовых пленок. Период полученной структуры составил  $1,04 \pm 0,05$  мкм, что хорошо коррелирует с теорией формирования ЛИППС. В качестве материала сенсора был использован двухкомпонентный силикон Ласил Т-5, обладающий достаточной текучестью для заполнения микро- и нано-рельефов, а также удлинением на разрыв до 300% и низким коэффициентом усадки  $< 0,1\%$ . Для проведения экспериментов изготовлены образцы толщиной 0,5 и 1 мм. По результатам оптической микроскопии было установлено, что период рельефа, перенесенного на силиконовые пленки, составил  $1,05 \pm 0,04$  мкм, что соответствует структуре мастер-матрицы.

Были проведены измерения тензометрических свойств образцов при растяжении с использованием осветительных диодных лазеров с длинами волн 650 и 532 нм. В недеформированном состоянии углы отклонения первых порядков дифракции составили  $38,7^\circ$  и  $30,8^\circ$  для 650 и 532 нм соответственно, что хорошо согласуется с теорией. По результатам измерений была установлена зависимость изменения угла дифракции для двух длин волн от величины удлинения силиконовой пленки. Полученные значения коррелируют с теоретическими представлениями об изменении угла дифракции при увеличении периода дифракционной решетки - функция выходит на асимптоту при больших значениях удлинения. При удлинении образцов на 180% изменение угла дифракции составило  $\sim 24^\circ$  и  $\sim 19^\circ$  для 650 и 532 нм соответственно.

По результатам экспериментов установлено, что толщина силиконовых пленок 1 и 0,5 мм не влияет на тензометрические свойства элемента. Однако варьирование толщины слоя позволяет управлять усилием, требуемым для растяжения образца на заданную величину. Было проведено измерение усилия на разрыв. Для образцов 0,5 и 1 мм значения составили 13 Н и 28 Н соответственно.

### **Выводы**

В работе предложен новый подход к созданию тензометрических элементов для измерения величины линейных смещений. Были подготовлены образцы силиконовых пленок толщиной 0,5 мм и 1 мм. При удлинении образцов на 180% изменение угла отклонения первых порядков дифракции составило  $20^\circ$  и  $15^\circ$  для осветительных лазеров 650 и 532 нм соответственно. При этом значения усилия на разрыв составили 13 Н и 28 Н. Предложенные подходы и результаты имеют перспективы развития в качестве элементов носимой электроники и робототехники.

### **Литература**

1. Heikenfeld J. et al. Wearable sensors: modalities, challenges, and prospects //Lab on a Chip. – 2018. – Т. 18. – №. 2. – С. 217-248.
2. Yue X. et al. Flexible wearable optical sensor based on optical microfiber Bragg grating //Journal of Lightwave Technology. – 2022. – Т. 41. – №. 6. – С. 1858-1864
3. Guo Z. et al. High-sensitive and stretchable resistive strain gauges: Parametric design and DIW fabrication //Composite Structures. – 2019. – Т. 223. – С. 110955.
4. Elnady F. E. M. et al. Effect of Thermal Noise on the Strain Gradient Sensor Using Cascaded Fiber Bragg Gratings //Microwave and Optical Technology Letters. – 2025. – Т. 67. – №. 9. – С. e70394.