

Санкт-Петербургский государственный университет

СТОЛЯРОВ Василий Александрович

Выпускная квалификационная работа

Металповерхности, чувствительные к ориентации плоскости поляризации падающего излучения

Уровень образования: магистратура

Направление *03.04.02 «Физика»*

Основная образовательная программа *ВМ.5511.2021 «Физика»*

Научный руководитель:

Профессор, кафедра общей физики I,
д.ф.-м.н., профессор, Венедиктов В.Ю.

Рецензент:

Старший преподаватель,
кафедра лазерных измерительных
навигационных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ»,
к.ф.-м.н. Севрюгин А.А.

Санкт-Петербург 2023

Оглавление

Введение	3
1 Литературный обзор	4
1.1 Датчики угла поворота.....	4
1.2 Метаматериалы и метаповерхности	7
1.3 Резонанс стелющейся моды в метаповерхностях.....	9
1.4 Использование метаповерхностей для создания датчика угла поворота	10
1.5 Чувствительность ДУП на основе метаповерхностей	14
2 Создание метаповерхности	16
2.1 Определение ожидаемых параметров структуры.....	16
2.2 Закупка подложек из кварцевого стекла JGS3.....	18
2.3 Напыление покрытия из Ta ₂ O ₅	18
2.4 Нанесение литографической маски	18
2.5 Ионное травление слоя из Ta ₂ O ₅	21
2.6 Удаление литографической маски	21
3 Анализ параметров полученной метаповерхности.....	22
3.1 Анализ параметров структуры на СЭМ	22
3.2 Анализ параметров структуры на СЗМ	24
3.3 Элементный анализ структуры методом РСМА	26
4 Моделирование свойств метаповерхности.....	28
5 Эксперимент	30
5.1 Экспериментальная установка	30
5.2 Результаты эксперимента	32
5.3 Выводы	35
Заключение	36
Благодарность	37
Список литературы.....	38

Введение

Одной из главных тенденций в разработке современных оптических технологий является миниатюризация их элементов. В настоящее время уменьшение размеров большей части классических оптических элементов, таких как линзы, зеркала, светофильтры, столкнулось с фундаментальными ограничениями. В связи с этим начался поиск новых концепций и принципов, на которых могут быть разработаны оптические элементы намного меньших по сравнению с современными размерами. Одним из возможных решений обозначенной проблемы стало использование метаповерхностей [1]. Метаповерхности благодаря их удивительным свойствам позволяют уменьшить размеры оптических элементов на порядки.

Данная работа посвящена исследованию и созданию такого оптического элемента, как датчик угла поворота, на основе наноструктурированной метаповерхности. В настоящее время датчики угла поворота активно используются в робототехнике, автомобильной промышленности, системах определения скорости, системах навигации и позиционирования [2].

Целями данного исследования являются создание датчика угла поворота на основе наноструктурированной метаповерхности в виде субволновой решетки с заданными параметрами, анализ параметров полученной структуры с помощью современных методов исследования (СЭМ, СЗМ, РСМА), компьютерное моделирование свойств полученной метаповерхности в программном пакете COMSOL Multiphysics и постановка эксперимента по определению спектральных свойств полученной структуры при её повороте.

1 Литературный обзор

1.1 Датчики угла поворота

Датчик угла поворота (ДУП) – это устройство, измеряющее угол поворота поверхности, на которой он установлен, путём преобразования информации об угловой позиции в аналоговый или цифровой сигнал [2]. Датчики угла поворота подразделяют по способу выдачи информации (на абсолютные и инкрементные) и по принципу действия (на оптические, магнитные, механические, индуктивные etc.). Инкрементные датчики при повороте поверхности посылают на выход импульсы, по количеству которых можно определить угол поворота относительно выбранного начального положения [3]. В связи с этим при каждом включении инкрементные датчики нужно калибровать для определения абсолютного угла поворота. Однозначным преимуществом инкрементных датчиков являются простота и дешевизна, однако они имеют ряд существенных недостатков, одним из которых является то, что при пропуске по какой-то причине сигнала от датчика невозможно установить ошибку. В свою очередь, абсолютный датчик [4] посылает на выход сигнал, по которому можно однозначно определить угол поворота, однако стоят такие датчики на порядок дороже.

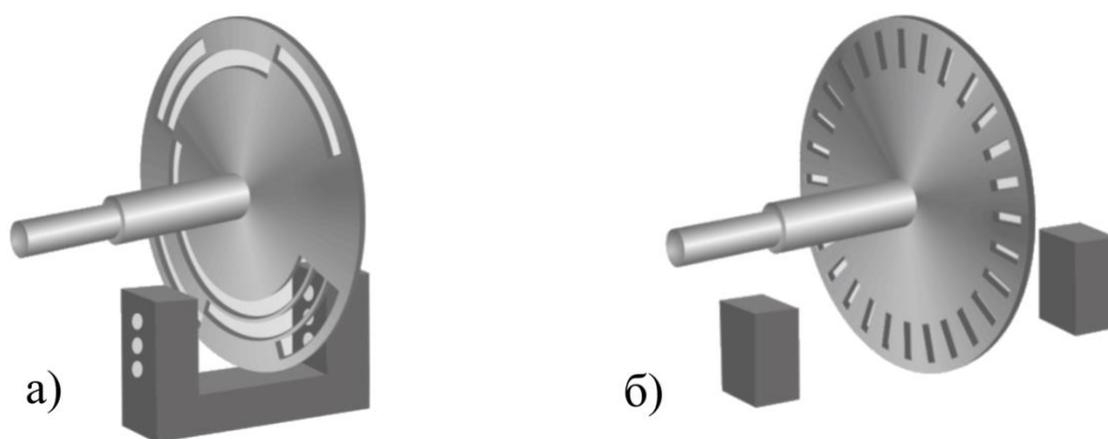


Рис. 1: Устройство абсолютного (а) и инкрементного (б) оптического датчика угла поворота

Для примера рассмотрим инкрементный (Рис. 1а) и абсолютный (Рис. 1б) оптический датчик угла поворота [5]. Оптический датчик состоит из источника излучения, угловой шкалы и считывателя информации о положении шкалы

(фотодетектора). Шкала инкрементного оптического датчика угла поворота обычно представляет собой диск с чередованием пропускающих и не пропускающих излучение областей (Рис. 2а). При попадании в пропускающую область излучение поступает на фотодетектор (Рис. 2б), а при попадании в непропускающую – не проступает (Рис. 2в). Таким образом, по количеству попаданий излучения на фотодетектор можно определить угол поворота шкалы относительно её начального положения. Кроме того, можно определить скорость вращения шкалы.

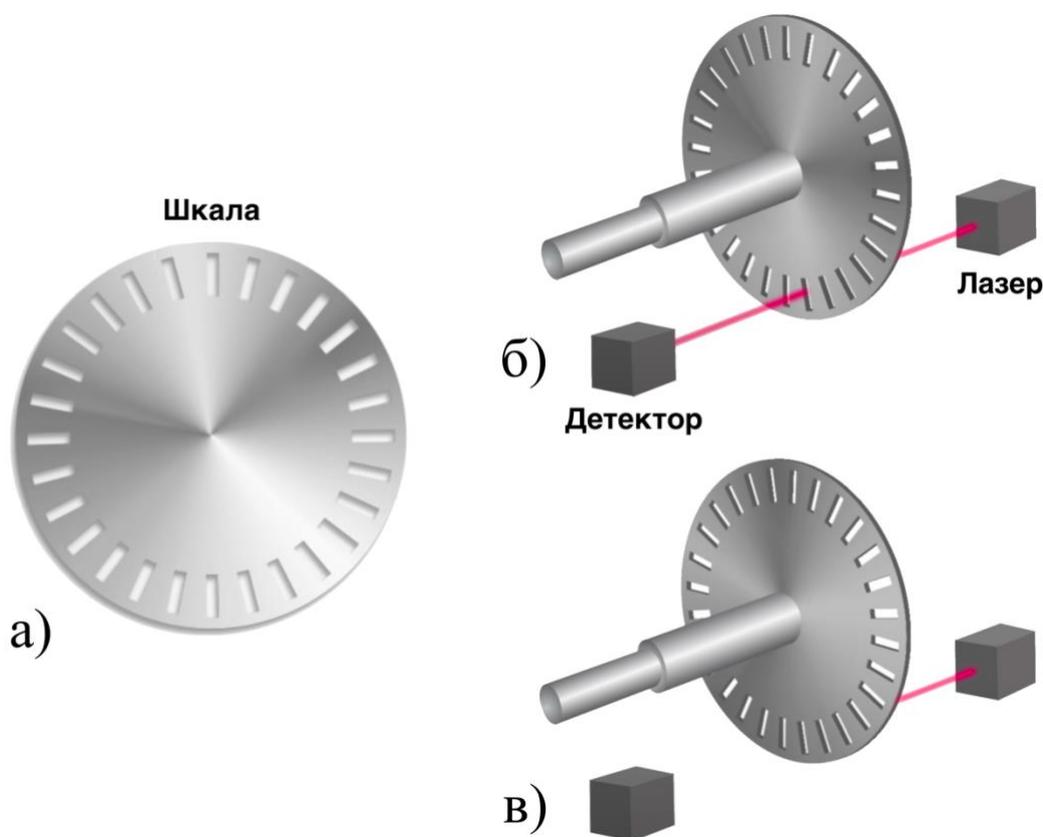


Рис. 2: Принцип работы инкрементного оптического датчика угла поворота. Шкала (а), ДУП при попадании излучения на фотодетектор (б), ДУП при попадании излучения в непропускающую зону (в)

Конструкция абсолютного оптического датчика угла поворота устроена более сложным образом [5]. Шкала в виде диска поделена на определенное количество секторов, для каждого из которых реализована уникальная последовательность пропускающих и не пропускающих излучение областей в радиальном направлении (Рис. 3а). Таким образом, для рассматриваемого примера, используя три источника излучения и три фотодетектора (количество источников и детекторов может меняться в зависимости от вида секторов),

каждому сектору можно сопоставить уникальный двоичный код (0 – нет сигнала на детекторе, 1 – есть сигнал) (Рис. 3б), по которому можно однозначно определить угол поворота шкалы. Разрешающая способность такого датчика зависит от количества секторов, на которые поделена шкала (для рассматриваемого оптического датчика точность составляет 45° , так как шкала поделена на 8 областей).

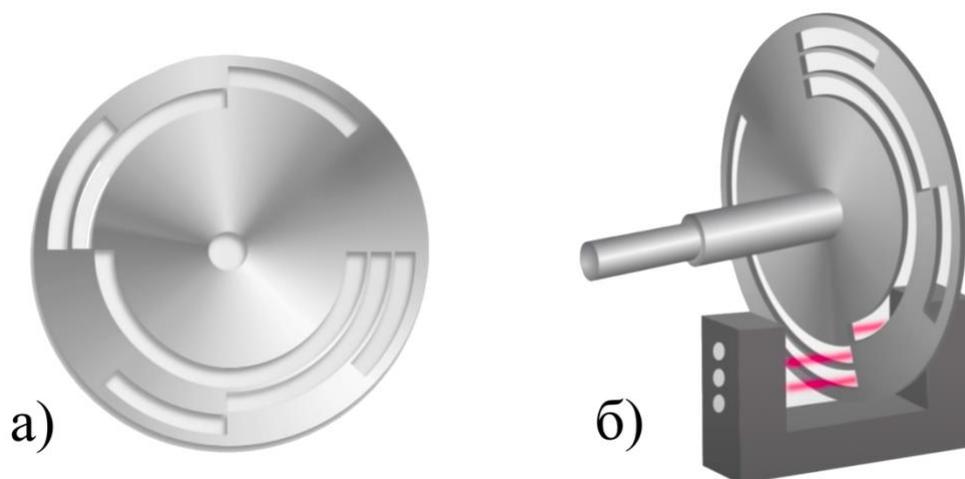


Рис. 3: Принцип работы абсолютного оптического датчика угла поворота.
Шкала (а), прохождение излучения от лазера к детектору (б)

В настоящее время как инкрементные, так и абсолютные датчики угла поворота используются во многих областях науки и техники: в автомобильной промышленности (например, датчики ABS и ESP), в робототехнике (для детектирования положения звеньев и суставов роботов), в авиации (для контроля положения поворотных элементов, таких как флапсы, элероны и рули высоты), в навигационных системах и многих других областях [6].

Однако, существует проблема, связанная с тем, что минимальные размеры угловых шкал современных датчиков угла поворота ограничиваются величиной порядка 5 мм, что не позволяет устанавливать их на микро- и нанообъекты. В связи с этим использование метаповерхностей, чувствительных к ориентации плоскости поляризации падающего излучения, в качестве шкал для датчиков угла поворота имеет большие перспективы, поскольку позволяет уменьшить их размеры до десятков микрон, то есть на несколько порядков.

Исследуемый датчик угла поворота на основе наноструктурированной субволновой метаповерхности является абсолютным оптическим бесконтактным датчиком угла поворота.

1.2 Метаматериалы и метаповерхности

Метаматериалы представляют собой класс искусственно созданных структур, дизайн которых на микро- или наноуровне позволяет управлять световыми волнами и достигать эффектов, которые не встречаются в природе [7]. Некоторые примеры метаматериалов приведены на Рис. 4.

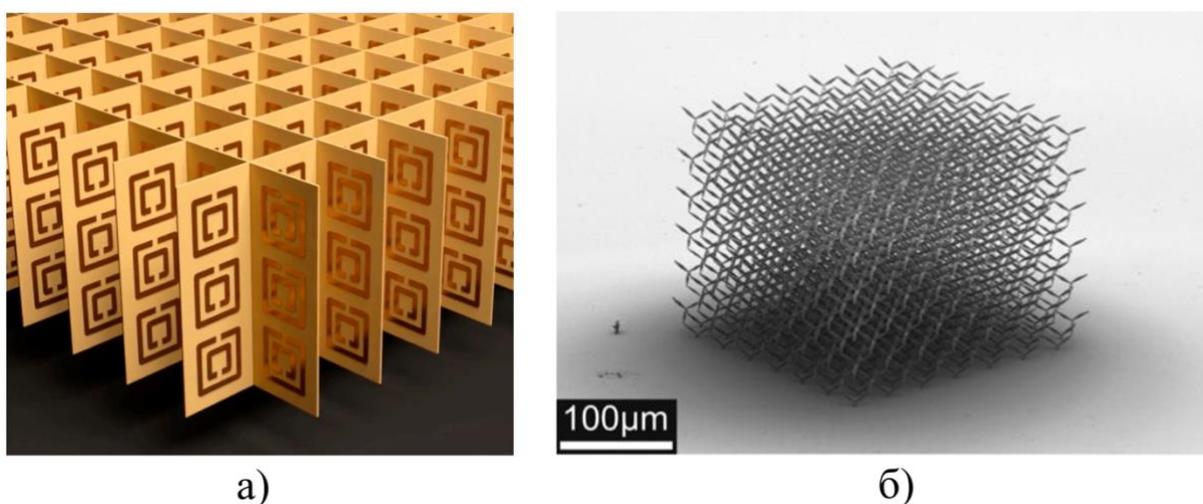


Рис. 4: Примеры наноструктурированных метаматериалов: [8] (а), [9] (б)

Метаматериалы отличаются от традиционных материалов тем, что их взаимодействие с электромагнитными волнами определяется в первую очередь архитектурой материала, а не его химическим составом. Это открывает возможность для создания материалов с показателем преломления, отличным от естественного, вплоть до отрицательных значений [10], что может быть использовано для создания суперлинз, невидимости и других приложений. Однако несмотря на свои удивительные свойства, метаматериалы имеют ряд существенных недостатков, в первую очередь, большие потери, сильную дисперсию и сложность изготовления. Преодолеть упомянутые проблемы позволяют метаповерхности [11] – двумерный аналог метаматериалов.

Метаповерхности имеют субволновую толщину и изготавливаются путём нанесения на двумерную поверхность различных периодических структур произвольной формы (мета-атомов) либо травлением определенных структур на поверхности. Некоторые примеры метаповерхностей приведены на Рис. 5.

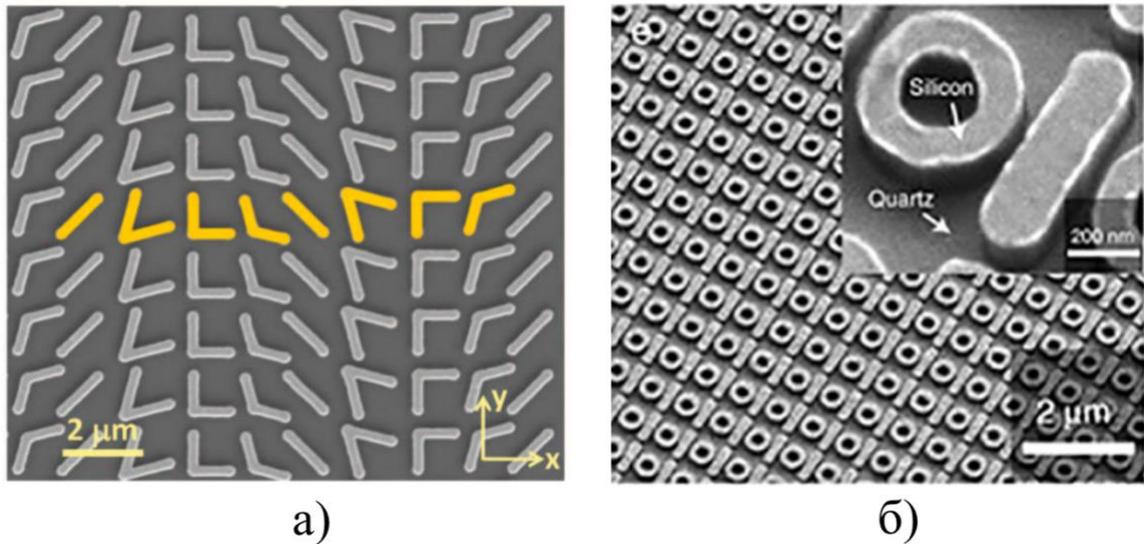


Рис. 5: Примеры наноструктурированных метаповерхностей: [12] (а), [13] (б)

Метаповерхности имеют свойство изменять амплитуду, фазу, волновой фронт, поляризацию падающего на них света произвольным образом. Одно из ключевых преимуществ метаповерхностей заключается в их способности к монолитной интеграции с другими оптоэлектронными компонентами, такими как лазеры, диоды, транзисторы и фотодетекторы. Это делает их идеально подходящими для создания компактных, интегрированных устройств с высокой функциональностью, например, датчиков угла поворота. Кроме того, они позволяют уменьшить габариты элементов оптических систем на порядки. В связи с этим метаповерхности нашли применение в большом количестве областей современной науки и техники: голографии, телекоммуникационных технологиях, микроскопии, спектроскопии, формировании изображений, задачах фильтрации [14].

Особый интерес представляют метаповерхности, при прохождении электромагнитного излучения через которые возбуждается резонанс стелющейся моды. Данное свойство метаповерхностей позволяет использовать их в качестве элементов датчиков угла поворота [15].

1.3 Резонанс стелющейся моды в метаповерхностях

Явление резонанса стелющейся моды в субволновых решетках подробно описывается в работе [16]. Для объяснения данного явления необходимо рассмотреть два процесса, происходящих на метаповерхности одновременно. Во-первых, поскольку метаповерхность представляет из себя дифракционную решетку, свет, проходя сквозь неё, испытывает дифракцию, и возникают определенные дифракционные порядки. Во-вторых, поскольку субволновую метаповерхность можно рассматривать как волновод, при попадании на неё электромагнитное излучение возбуждает собственные моды её слоёв в плоскости, перпендикулярной падению. Явление резонанса стелющейся моды заключается в резонансе собственных мод метаповерхности с модами дифракционных порядков (Рис. 6а), при котором в спектре пропускания излучения с произвольной поляризацией и при нормальном падении возникают два провала на резонансных частотах (один из провалов соответствует ТМ поляризации, а другой – ТЕ), а в спектре отраженного излучения – два пика на тех же частотах.

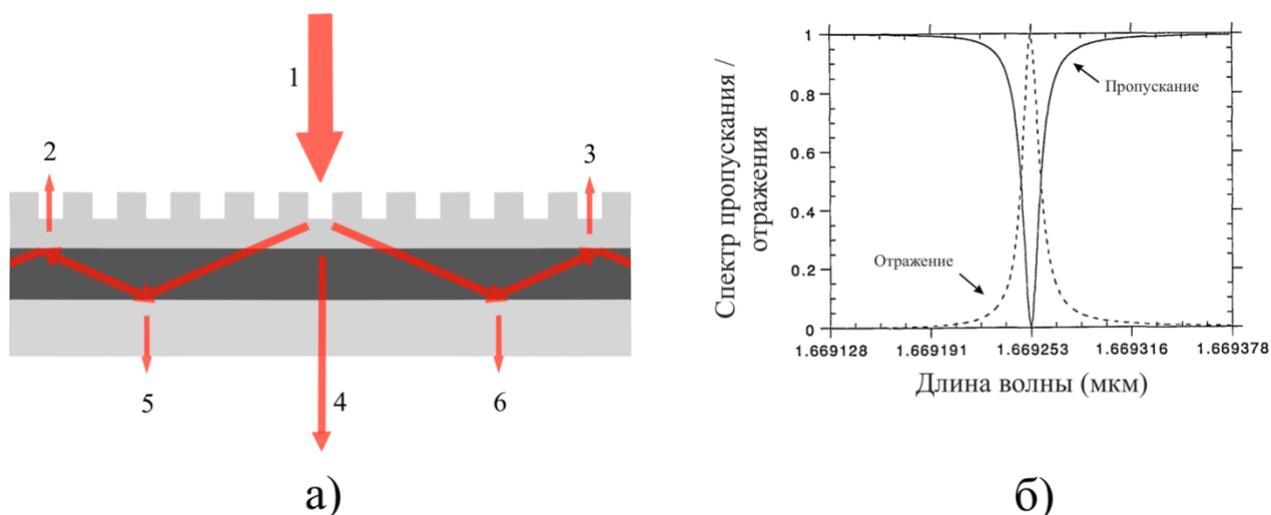


Рис. 6: Прохождение излучение через метаструктуру при резонансе стелющейся моды (а), спектры прохождения и отражения при резонансе стелющейся моды [17] (б)

На Рис. 6б изображены спектры прохождения и отражения при резонансе стелющейся моды в случае падения ТМ поляризации. Провалы возникают из-за деструктивной интерференции проходящих метаструктуру пучков (пучки 4, 5, 6

на Рис. 6а), а пики – из-за конструктивной интерференции вышедших из метаструктуры пучков в направлении, противоположном направлению падения излучения на структуру (пучки 2, 3 на Рис. 6а). Данное явление позволяет создавать большое количество оптических элементов, в том числе, спектрометры, перестраиваемые светофильтры, биосенсоры и, наконец, оно позволяет использовать метаповерхности для создания датчиков угла поворота [18].

1.4 Использование метаповерхностей для создания датчика угла поворота

Известно [19], что характер резонанса стелющейся моды зависит от углов наклона и поворота субволновой метаповерхности относительно падающего излучения. По виду спектра отражения или пропускания метаповерхности можно определить вплоть до трёх углов поворота относительно трёх ортогональных осей. При падении излучения на наноконструированную метаповерхность под углом, отличным от нормального, резонансные линии претерпят расщепление и сдвинутся по частоте, так как углы распространения дифракционных порядков, вступающих в резонанс, будут различаться для распространения мод влево и вправо и, таким образом, возникнут две различные резонансные частоты. При изменении ориентации плоскости линейной поляризации падающего излучения будут изменяться интенсивности пиков и провалов, соответствующие ТМ и ТЕ поляризациям. Рассмотрим эти процессы по-отдельности более подробно.

Сначала обсудим зависимость от угла поворота плоскости поляризации. Рассмотрим метаповерхность в виде прямоугольной диэлектрической решетки, приведённой на Рис. 7а, на которую падает излучение с линейной поляризацией, повернутой на угол θ относительно оси ОХ [20].

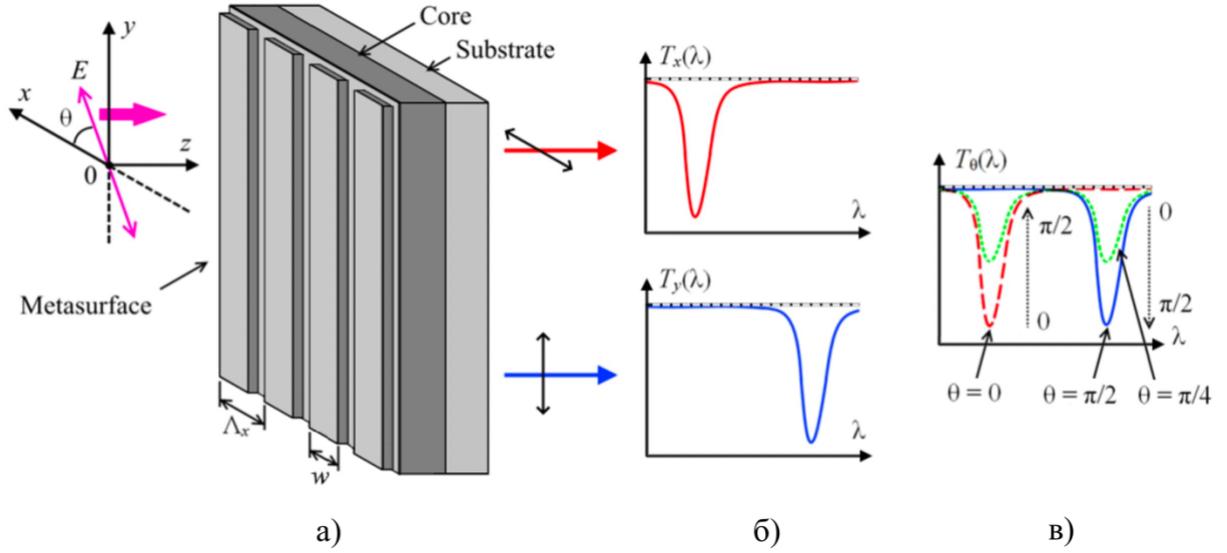


Рис. 7: Метаповерхность в виде субволновой диэлектрической решетки (а), спектры пропускания при падении ТЕ и ТМ поляризации (б), спектры пропускания при падении произвольной поляризации (в)

Падающее электромагнитное излучение можно разделить на две компоненты – поляризованное по оси ОХ (ТМ) и поляризованное по оси ОУ (ТЕ). Как было показано в [21], показатели преломления по осям ОХ и ОУ в общем случае разные. Для случая когда $\Lambda_x/\lambda < 1/10$ (Λ_x – период решетки, λ – длина волны), справедливы следующие формулы:

$$n_x^{(0)} = \sqrt{\frac{w/\Lambda_x}{n_2^2} + \frac{1 - w/\Lambda_x}{n_1^2}} \quad (1)$$

$$n_y^{(0)} = \sqrt{(w/\Lambda_x)n_2^2 + (1 - w/\Lambda_x)n_1^2} \quad (2)$$

где n_x – показатель преломления вдоль оси ОХ, n_y – показатель преломления вдоль оси ОУ, w – ширина штрихов метаповерхности, Λ_x – период решетки, n_1 – показатель преломления материала метаповерхности, n_2 – показатель преломления окружающей среды.

Для случая когда $1/10 < \Lambda_x/\lambda < 3/2$, справедливы следующие формулы:

$$n_x^{(2)} = \sqrt{\left(n_x^{(0)}\right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{\pi w (1 - w/\Lambda_x)}{\lambda} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \right)^2 \left(n_x^{(0)}\right)^6 \left(n_y^{(0)}\right)^2} \quad (3)$$

$$n_y^{(2)} = \sqrt{\left(n_y^{(0)}\right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{\pi w \left(1 - w/\Lambda_x\right) \left(n_2^2 - n_1^2\right)}{\lambda}\right)^2} \quad (4)$$

Вследствие такого различия показателей преломления для различных направлений распространения света резонансные линии в спектрах пропускания и отражения для ТМ и ТЕ поляризаций располагаются на разных частотах (Рис. 7б). Если плоскость поляризации падающего излучения параллельна направлению штрихов решетки, то в спектре пропускания наблюдается только один провал, соответствующий ТЕ поляризации. В случае если плоскость поляризации повернута на $\pi/2$ относительно направления штрихов, то в спектре присутствует только провал, отвечающий за ТМ поляризацию. В свою очередь, при повороте плоскости поляризации на $\pi/4$ относительно направления штрихов в спектре присутствуют два равных по глубине провала (Рис. 7в).

Коэффициент пропускания при повернутой на угол θ поляризации падающего излучения зависит от длины волны следующим образом [22]:

$$T(\lambda) = T_{TE}(\lambda) \cos^2 \theta + T_{TM}(\lambda) \sin^2 \theta \quad (5)$$

В таком случае зависимость коэффициента пропускания ТМ моды при резонансной длине волны от угла поворота поляризации будет описываться функцией $\sin^2 \theta$ (Рис. 8). Таким образом, мы можем измерять угол поворота метаповерхности по глубине провала, соответствующего ТМ или ТЕ поляризации, в спектре прошедшего излучения.

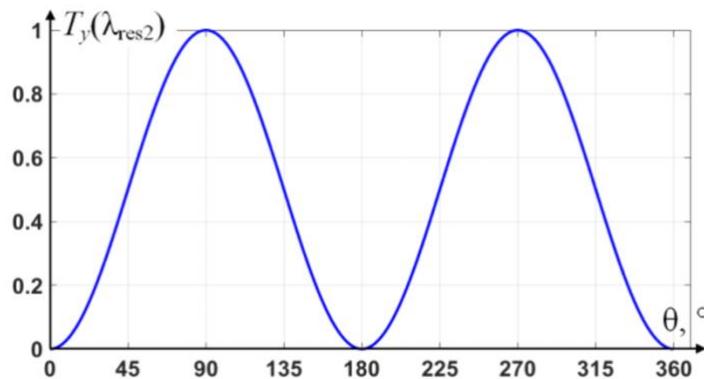


Рис. 8: Зависимость коэффициента пропускания для ТМ поляризации от угла поворота плоскости поляризации при нормальном падении излучения на метаповерхность [22]

Теперь обсудим, как будет изменяться спектр прошедшего излучения в зависимости от угла поворота плоскости поляризации. Известно [19], что по виду спектра отражения или пропускания света сквозь наноструктурированную метаповерхность можно определить угол наклона объекта относительно оси, параллельной направлению штрихов на метаповерхности. Данное утверждение является следствием того, что из-за падения света на метаструктуру под некоторым углом к поверхности отрицательные и положительные дифракционные порядки распространяются под разными углами относительно плоскости падения света, в результате чего резонансные линии в спектре пропускания/отражения излучения претерпевают расщепление (Рис. 9).

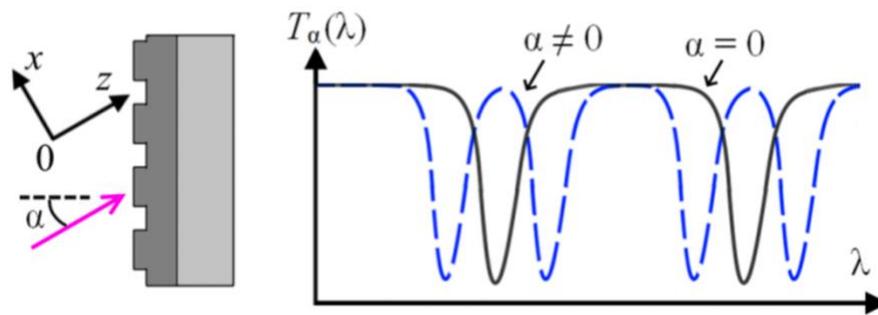


Рис. 9: Расщепление спектра при изменении угла падения излучения на метаповерхность [22]

Величина расщепления резонансных линий спектра будет тем больше, чем больше угол падения излучения на метаповерхность, что даёт возможность определять угол падения излучения на метаповерхность по полученному спектру отражения/пропускания.

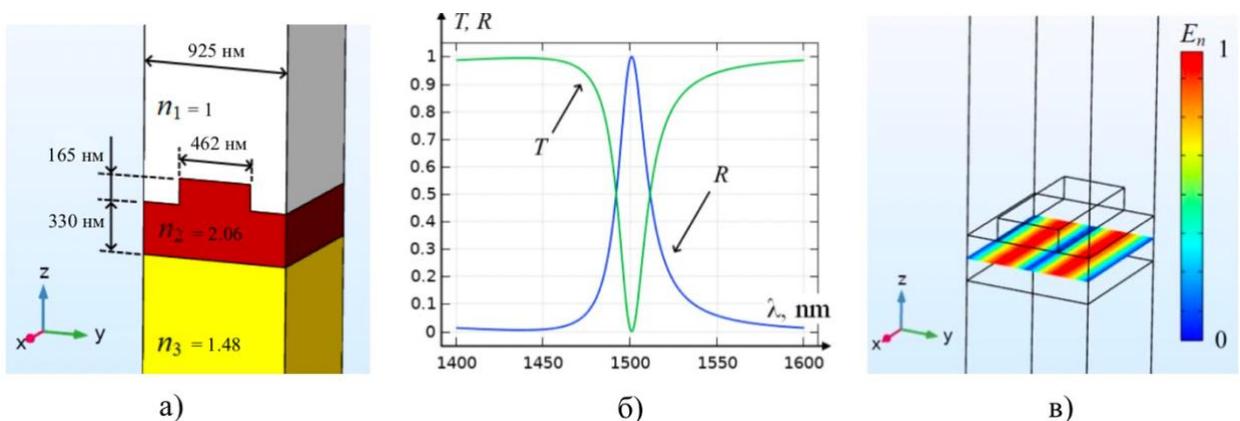


Рис. 10: Параметры мета-атома из модели [20], спектральная линия для ТМ поляризации (б), распространение волноводных мод в метаповерхности (в)

В [20] было проведено моделирование (в программном пакете Comsol Multiphysics) спектрального отклика метаповерхности при изменении угла её наклона относительно падающего излучения. Параметры используемой при моделировании структуры приведены на Рис. 10а. Падающее на поверхность излучение имело ТМ поляризацию, в результате чего в спектре пропускания наблюдался один провал с центром на длине волны около 1500 нм, а в спектре отражения – один пик с центром на той же частоте (Рис. 10б). На Рис. 10в изображены распространяющиеся внутри метаповерхности в двух противоположных направлениях волноводные моды. Результат моделирования приведён на Рис. 11. Как видно из моделирования, по величине расщепления спектральных линий или по величине смещения одной из расщепленных линий относительно положения нулевой линии можно определить угол наклона метаповерхности вокруг оси, параллельной направлению штрихов на структуре.

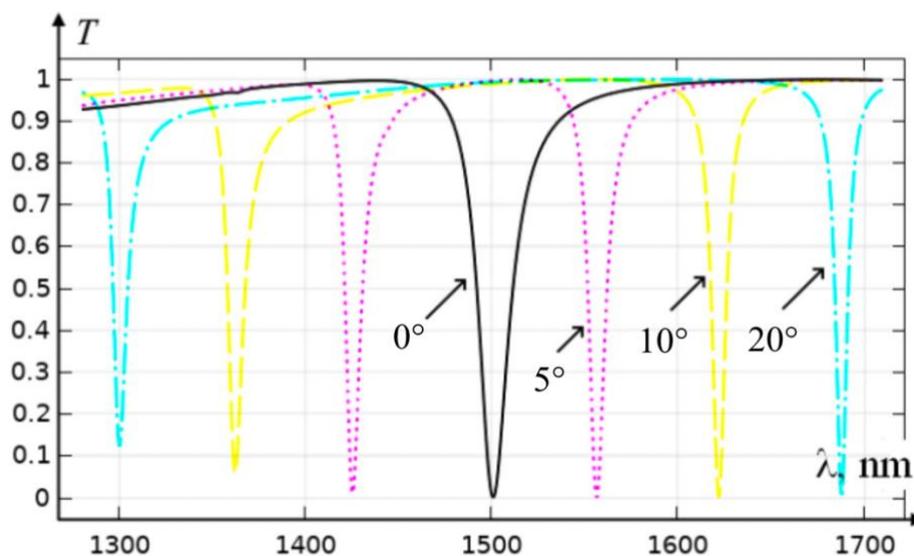


Рис. 11: Зависимость величины расщепления от угла падения излучения на метаповерхность [20]

1.5 Чувствительность ДУП на основе метаповерхностей

Для оценки эффективности датчика угла поворота важно учесть такую его характеристику, как чувствительность. В [22] было показано, что чувствительность на фундаментальном уровне ограничивается фотонными

шумами. Выражение для предельно возможной чувствительности датчика угла поворота на основе метаповерхностей выглядит следующим образом:

$$\delta\theta = \sqrt{\frac{hf\mu}{2P_{in}\tau}} \quad (6)$$

где $\delta\theta$ – чувствительность ДУП, P_{in} – мощность излучения, проходящего метаповерхность, τ – время интегрирования сигнала, полученного фотоприёмником, f – частота излучения, h – постоянная Планка, μ – квантовая эффективность фотоприёмника.

К примеру, при $f = 200$ ТГц, $\mu = 1$, $P_{in} = 1$ мВт, $\tau = 1$ мкс: $\delta\theta \approx 2''$.

2 Создание метаповерхности

Создание метаповерхности для постановки эксперимента по определению её спектральных свойств проводилось в несколько этапов: определение ожидаемых параметров структуры, закупка подложек из кварцевого стекла JGS3, напыление на подложки покрытия из Ta_2O_5 , нанесение литографической маски на поверхность образца, ионное травление слоя из Ta_2O_5 , удаление литографической маски. В данной главе будут описаны основные этапы получения метаструктуры.

2.1 Определение ожидаемых параметров структуры

Основных критериев, по которым определялись оптимальные параметры для будущей структуры, было несколько. В первую очередь, для проведения эксперимента было необходимо, чтобы один из провалов в спектре пропускания метаповерхности, по глубине которого определяется угол поворота поверхности вокруг оси, перпендикулярной этой поверхности, находился в пределах рабочей зоны использовавшегося в эксперименте перестраиваемого лазера, а именно, Zewda ZD8501C Tunable Light Source, диапазон длин волн которого составляла от 1521.88 нм до 1571.10 нм (центр рабочей зоны – 1546.5 нм). Другим важным критерием было то, чтобы ширина провала в спектре могла быть различима фотоприёмником, регистрирующим спектр прошедшего сквозь метаповерхность излучения. Приведённые критерии накладывают ограничения на следующие параметры метаповерхности: период решетки, ширину штрихов решетки, глубину травления, толщину слоя диэлектрика, показатель преломления (материал) диэлектрика, показатель преломления (материал) подложки.

Для моделирования была использована модель, описанная в [20]. В результате моделирования прохождения излучения сквозь метаповерхность в программном пакете COMSOL Multiphysics (Рис. 12) с учётом приведенных выше критериев были подобраны следующие параметры: материал диэлектрика – Ta_2O_5 с показателем преломления 2.085, материал подложки – кварцевое стекло

с показателем преломления 1.445, период решетки – 920 нм, ширина штрихов решетки – 460 нм, глубина травления – 160 нм, толщина слоя Ta_2O_5 – 390 нм. Для таких значений параметров центр резонансной линии для ТМ поляризации располагается на длине волны 1552 нм.

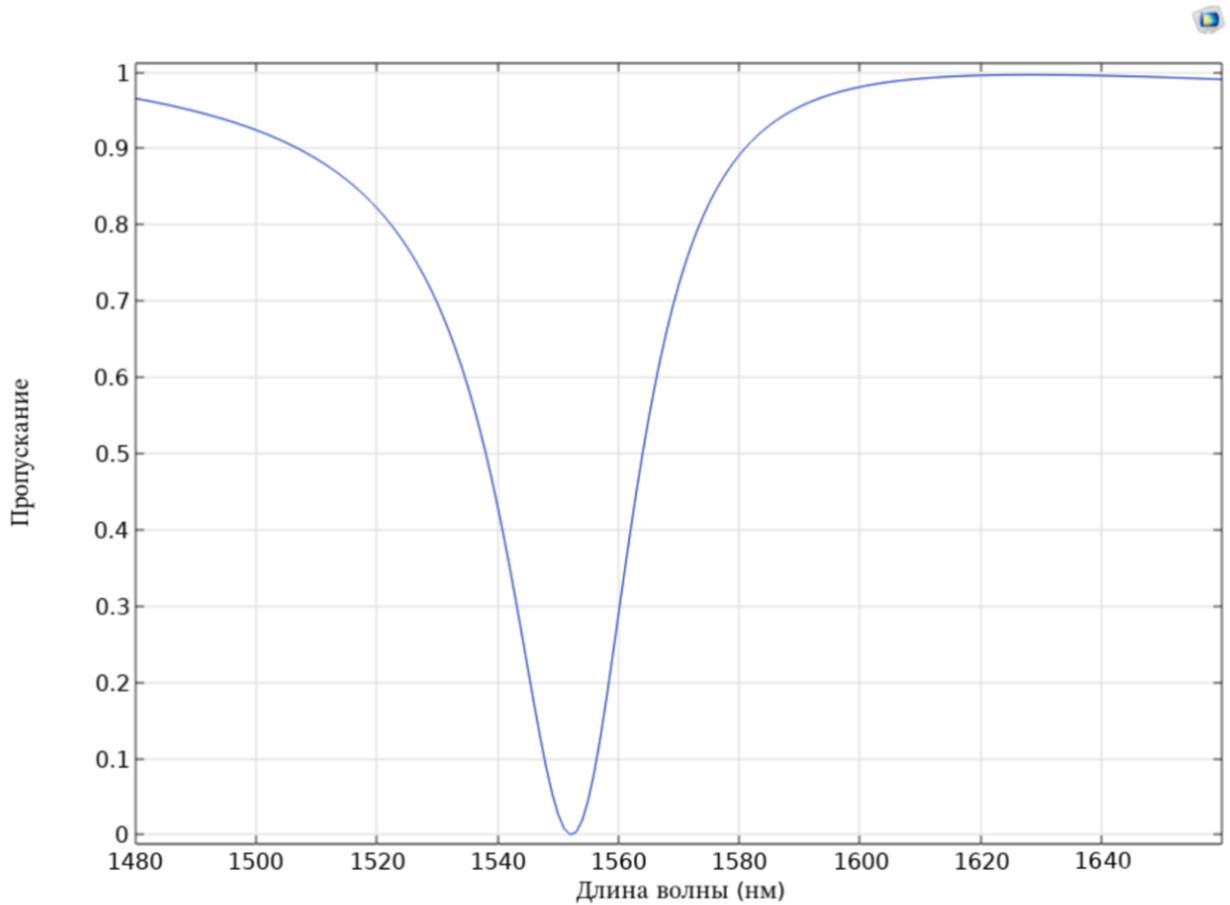


Рис. 12: Моделирование спектра пропускания метаповерхности для определения её параметров при изготовлении

Критерием для выбора размера метаповерхности было, во-первых, то, чтобы размер метаповерхности был порядка диаметра падающего на неё лазерного пучка, а во-вторых, технические возможности при изготовлении структуры. Оптическая система, использовавшаяся для постановки эксперимента, позволила получить диаметр пучка, который в первую очередь определялся размером диафрагмы, около 0.5 мм. Таким образом, размер метаповерхности был выбран 400 на 400 мкм.

2.2 Закупка подложек из кварцевого стекла JGS3

В качестве материала подложек было выбрано кварцевое стекло JGS3 из-за его высокого коэффициента пропускания инфракрасного излучения, который составляет более 90% [23]. Как и другие виды кварцевого стекла, JGS3 получают путем плавления SiO_2 при очень высоких температурах. Результатом является материал, который обладает отличной термической стабильностью и устойчивостью к большинству химических реагентов. Благодаря своим свойствам кварцевое стекло JGS3 активно используется в задачах ИК-спектроскопии. Подложки длиной 12 мм, шириной 9 мм и толщиной 0.5 мм были заказаны из Китая.

2.3 Напыление покрытия из Ta_2O_5

В качестве материала поверхности метаструктуры был выбран оксид тантала (Ta_2O_5) по причине своей доступности, подходящего значения показателя преломления (2.085), высокой термической устойчивости и химической стабильности, что позволяет использовать его в суровых условиях. Кроме того, оксид тантала хорошо изучен в вопросах изготовления метаструктур [24].

Оксид тантала (Ta_2O_5) был напылен на подложки из кварцевого стекла JGS3. Данный этап создания метаповерхности проводился в Москве на установке оригинальной конструкции методом электронно-лучевого напыления. Контроль толщины производился методом оптического контроля по четвертьволновым промежуткам. Таким образом, полученная толщина покрытия из оксида тантала составила (390 ± 5) нм.

2.4 Нанесение литографической маски

Следующим этапом изготовления метаповерхности было нанесение литографической маски на слой оксида тантала для дальнейшего травления требуемой структуры. Нанесение происходило в несколько этапов. Сначала была

произведена чистка исходной поверхности – погруженный в стакан со спиртом образец был помещён в ультразвуковую ванну на две минуты и затем высушен на воздухе. После этого на поверхность из оксида тантала наносился резист: образец помещался в центрифугу Modular Spin Coater WS-650MZ-23NPP/LITE, и на его поверхность наносилась капля резиста ALLRESIST AR-P 672.045, после чего внутри центрифуги создавался вакуум и она вращалась в течение одной минуты со скоростью 6000 оборотов в минуту. В результате на поверхности образовалась равномерная плёнка резиста толщиной около 0.2 мкм. Затем образец был высушен на плите ЭКРОС ES-6120 при температуре 100° в течение минуты.

Следующим этапом нанесения литографической маски стало экспонирование резиста. Поскольку площадь подложки (12 x 9 мм²) в разы превосходила требуемую площадь метаструктуры (0.4 x 0.4 мм²), было решено создать на подложке шесть областей, для каждой из которых была подобрана своя доза облучения при экспонировании, в результате чего мы ожидали получить шесть структур с различными параметрами, чтобы в последствии выбрать одну – с наиболее близкими к требуемым параметрами. Экспонирование резиста проводилось в сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss Auriga Laser с управлением посредством программного обеспечения NanoMaker. Экспонирование производилось сфокусированным электронным пучком с различными параметрами для каждой из шести областей (порядок параметров пучка: энергия электронов – 30 кэВ, ток пучка – 20 пкА, время воздействия на растр – 2 мкс, шаг – 5 нм). Дозы облучения для шести областей составляли: 0.8d (область № 1), 0.9d (область № 2), 1d (область № 3), 1.2d (область № 5), 1.4d (область № 4), 1.5d (область №6), где d = 100 мкК/см². Заключительным этапом было проявление резиста посредством помещения экспонированного образца в стакан с проявителем на одну минуту и промыванием в спирте.

Полученные в результате нанесения литографической маски образцы были сфотографированы с помощью сканирующего электронного микроскопа Carl

Zeiss Auriga Laser. На Рис. 13а представлены микрофотографии шести областей, на Рис. 13б эти области представлены схематически и пронумерованы.

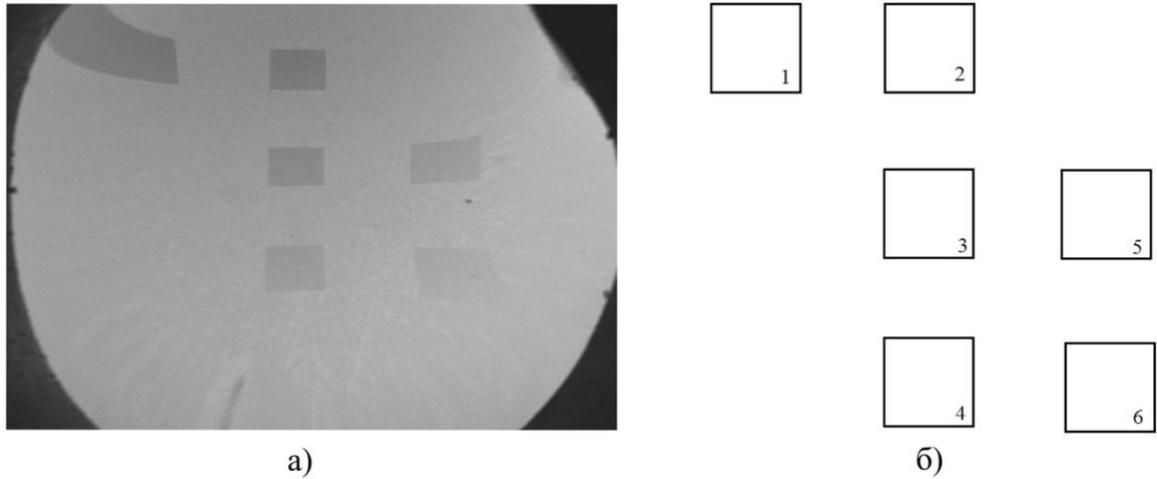


Рис. 13: Микрофотография шести полученных областей (а), схема областей № 1 – № 6 (б)

Ширина штрихов и период решетки полученной структуры были измерены в программе ImageJ. Наиболее удачной с точки зрения соответствия полученных параметров требуемым получилась структура № 3, микрофотографии которой с увеличением 42430х представлены на Рис. 14.

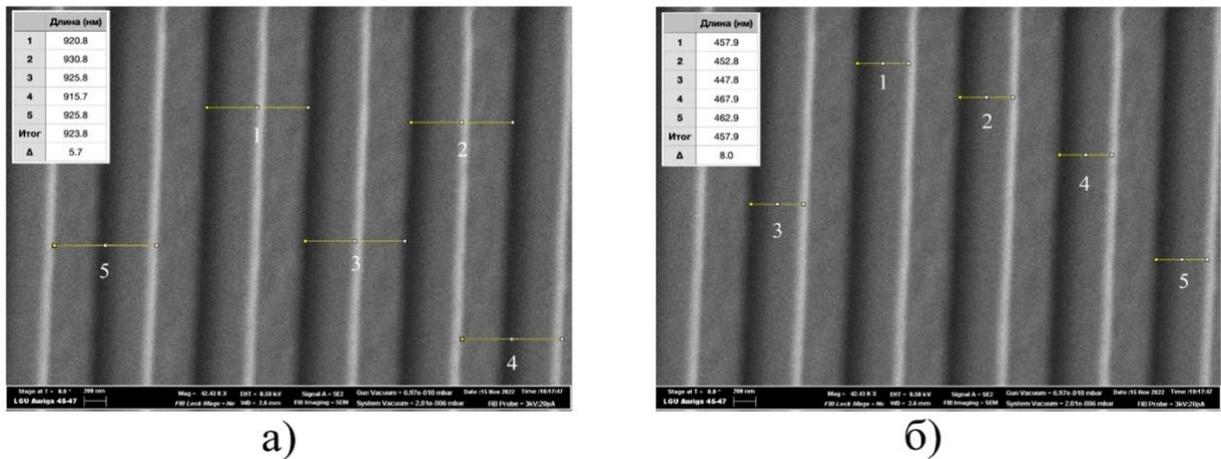


Рис. 14: Микрофотографии литографической маски для структуры № 3 с измеренными значениями периода решетки (а) и ширины штрихов (б)

По результатам измерения можно заключить, что как ширина штрихов, так и период решетки структуры № 3 достаточно однородны по поверхности структуры. Период решетки (Рис. 14а) составил (924 ± 6) нм, что совпадает с заданным (920 нм) в пределах указанной погрешности. В свою очередь, ширина

штрихов (Рис. 14б) составила (458 ± 8) нм, что также совпадает с заданной (460 нм) в пределах указанной погрешности.

2.5 Ионное травление слоя из Ta₂O₅

После нанесения маски из резиста происходило травление структуры ионами аргона с помощью установки ионно-лучевого травления Oxford Instruments IonFab-300 при следующих параметрах: время травления $t_{\text{трав}} = 140$ с, ускоряющее напряжение $U = 1$ кВ. При травлении структуры поток положительных ионов аргона в ускоряющем поле проходил через скрещенный поток электронов, в результате чего на структуру поступал в среднем нейтральный пучок, что препятствовало зарядке образца и способствовало однородности его травления. Для ухода материала с поверхности образца травление производилось под углом 5° , что привело к выраженной невертикальности стенок.

2.6 Удаление литографической маски

Заключительным этапом изготовления наноструктурированной метаповерхности стало удаление остаточного резиста с поверхности протравленного образца. Удаление резиста осуществлялось путём помещения погруженного в стакан с ацетоном образца в ультразвуковую ванну на 20 минут и дальнейшего высушивания на воздухе. Для окончательного очищения от резиста образец помещался в кислородную плазму, создаваемую генератором плазмы Fischione NanoClean Model 1070, на 4 минуты.

После данного этапа структура была готова к использованию в эксперименте, но перед этим для контроля полученных параметров были проведены рентгеноспектральный микроанализ поверхности образца, анализ параметров структуры на сканирующем электронном микроскопе и сканирующем зондовом микроскопе.

3 Анализ параметров полученной метаповерхности

Параметры и характеристики полученной метаповерхности были проанализированы несколькими методами: измерение ширины штрихов, периода решетки и размера метаструктур проводилось на сканирующем электронном микроскопе [25] Carl Zeiss Auriga Laser, для анализа снимков использовался программный пакет ImageJ; измерение глубины травления проводилось на сканирующем зондовом микроскопе [26] NTEGRA PRIMA, для анализа снимков использовался программный пакет NovaPX; элементный анализ методом РСМА [27] был проведен на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss Merlin.

3.1 Анализ параметров структуры на СЭМ

Измерение ширины штрихов, периода решетки и размера метаструктур проводилось на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss Auriga Laser, для анализа снимков использовался программный пакет ImageJ. По микрофотографиям с СЭМ были определены параметры для всех шести полученных структур.

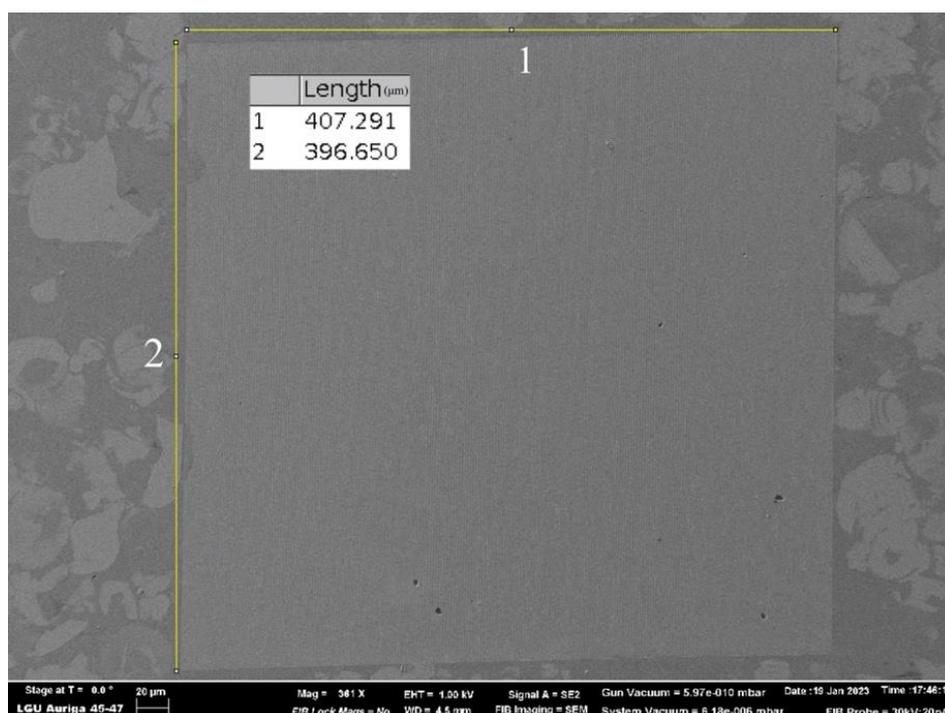
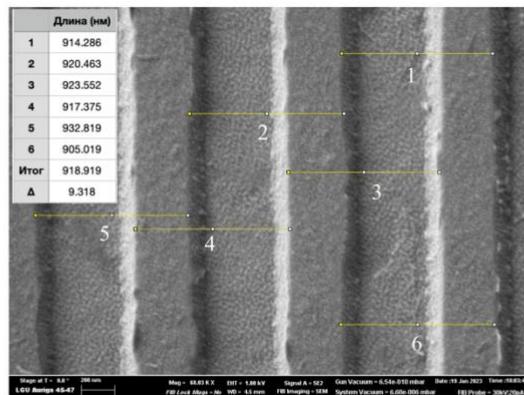


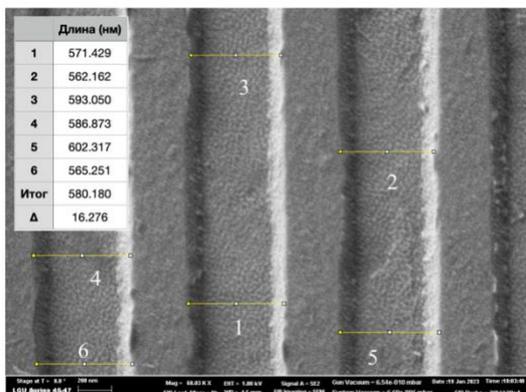
Рис. 15: Микрофотография области № 3 с измеренными значениями её размеров

Размеры метаструктур для всех шести областей соответствовали требуемому размеру ($400 \times 400 \text{ мкм}^2$) в пределах погрешности 3%. На Рис. 15 приведена полная фотография поверхности № 3 с увеличением 361х. При помощи программного пакета ImageJ были определены её размеры – $407 \times 397 \text{ мкм}^2$, что соответствует заданному в пределах погрешности 2%.

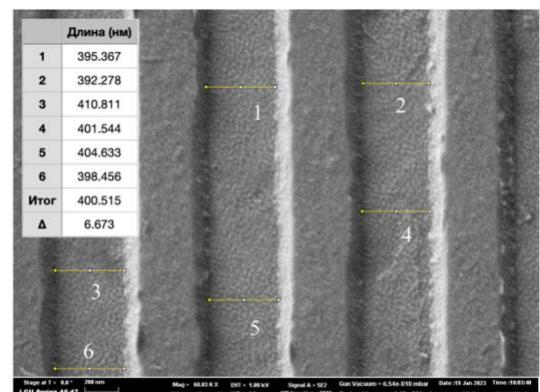
По микрофотографиям с увеличением 68030х можно определить период решетки и ширину штрихов решетки. Стоит отметить, что из-за неперпендикулярности травления ширина штрихов решетки сверху и снизу отличалась, в связи с чем полученная решетка имела трапециевидный профиль (вместо прямоугольного). Это обстоятельство повлияло на вид спектра прохождения света сквозь метаповерхность. При изменении профиля решетки с прямоугольной на трапециевидную и при увеличении ширины штрихов резонансные линии в спектре, соответствующие резонансу стелющейся моды, могут сместиться по оси, соответствующей длине волны.



а)



б)



в)

Рис. 16: Микрофотографии области № 3 с измеренными значениями периода решетки (а), ширины верхних штрихов (б), ширины нижних штрихов (в)

На Рис. 16 приведены микрофотографии области №3 с увеличением 68030х, по которым были определены период решетки и ширина штрихов сверху и снизу. Период решетки (Рис. 16а) составил (919 ± 9) нм, что соответствует заданным параметрам (920 нм) в пределах указанной погрешности. Ширина верхних штрихов (Рис. 16б) составила (580 ± 16) нм, в то время как нижних (Рис. 16в) – (401 ± 7) нм. Следовательно, заданная ширина штрихов 460 нм реализовалась для области № 3 примерно на 1/3 высоты стенок. Для областей № (1, 2, 4, 5, 6) измерения проходили аналогичным образом. Измеренные значения параметров всех шести областей без указания погрешностей представлены в Таблице 1.

Таблица 1:Измеренные параметры для областей № 1 – № 6

№	Период (нм)	Ширина сверху (нм)	Ширина снизу (нм)
1	920	476	335
2	922	515	356
3	919	580	401
4	922	831	571
5	921	687	480
6	921	869	606

3.2 Анализ параметров структуры на СЗМ

Измерение глубины травления проводилось на сканирующем зондовом микроскопе NTEGRA PRIMA, для анализа снимков использовался программный пакет NovaPX. На Рис. 17 представлен профиль структуры № 3, полученный на СЗМ.

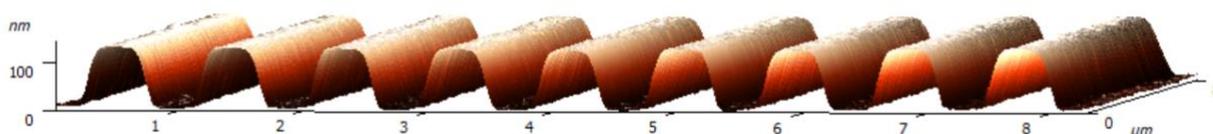


Рис. 17: Профиль структуры № 3

Для каждой структуры сканирование производилось на пяти участках размером 10×10 мкм² (в центре и по углам). В программном пакете NovaPX для каждого отсканированного участка было построено распределение по высотам,

на котором можно было различить два пика. По разности высот между пиками была определена глубина травления для пяти участков (центр и четыре угла) на каждой из шести структур.

Таблица 2: Измеренные значения глубины для пяти участков каждой из шести областей

№		1	2	3	4	5	6
Глубина (нм)	Центр	124,5	125,7	122,2	116,2	106	93
	Угол 1	130,4	115,1	127,3	118,2	100,5	98,1
	Угол 2	121	114,3	126,5	116,2	100,9	93
	Угол 3	123,3	124,9	119,8	114,7	113,5	93,4
	Угол 4	124,5	118,2	121	111,9	98,5	91,8
	Итог	124,7	119,6	123,4	115,4	103,9	93,9
	Δ	2,2	4,5	1,9	1,4	4,7	1,5

В Таблице 2 представлены результаты сканирования. Из таблицы видно, что в пределах одной структуры глубина травления может изменяться в пределах 15 нм. Кроме того, для шести структур глубина травления значительно отличается (максимальная – 130.4 нм, минимальная – 91.8 нм), что можно объяснить тем, что во время травления в областях, в которых осталось меньшее количество резиста, весь резист был стравлен и началось травление оксида тантала, который находился под резистом.

В Таблице 3 совмещены результаты анализа на СЭМ и СЗМ. По полученным результатам можно выбрать наиболее подходящую для поставленных задач структуру.

Таблица 3: Измеренные параметры областей № 1 – № 6 (период, ширина верхних штрихов, ширина нижних штрихов, глубина)

№	Период (нм)	Ширина сверху (нм)	Ширина снизу (нм)	Глубина (нм)
1	920	476	335	125
2	922	515	356	120
3	919	580	401	123
4	922	831	571	115
5	921	687	480	104
6	921	869	606	94

3.3 Элементный анализ структуры методом РСМА

Элементный анализ методом рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) был выполнен на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss Merlin. Микроструктура исследуемого образца с указанием областей, для которых был проведён элементный анализ методом РСМА приведена на Рис. 18а. На Рис. 18б приведён результат измерения спектра для области «Spectrum 3», из которого можно сделать вывод, что, кроме ожидаемого оксида тантала, на поверхности также присутствует небольшое количество углерода. Результаты элементного анализа методом РСМА приведены в Таблице 4.

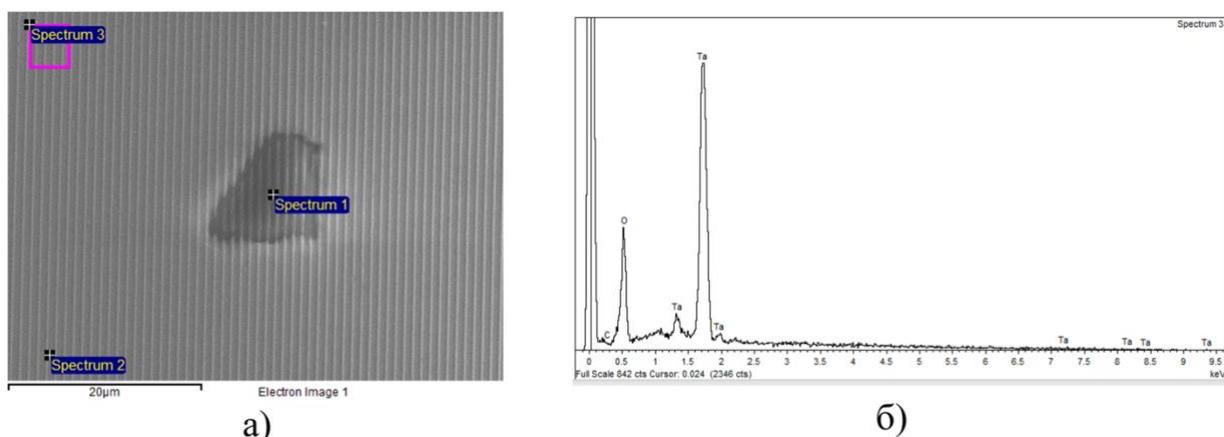


Рис. 18: Результаты элементного анализа методом РСМА: микроструктура метаповерхности с указанием областей, в которых измерялся спектр (а), результат измерения спектра для области "Spectrum 3" (б)

Таблица 4: Результаты анализа методом РСМА для трех участков на поверхности образца

	C	O	Si	Ta
Spectrum 1	6,76	66,95	26,31	0
Spectrum 2	13,01	64,47	0	21,81
Spectrum 3	11,52	65,59	0	22,89
Итого	10,43	65,67	26,31	22,35
Δ	2,45	0,86	0	0,54

Из результатов можно сделать вывод о том, что на поверхности образца присутствуют области с дефектами (например, область «Spectrum 1»), в которых травление достигло подложки из кварцевого стекла, однако из Рис. 15 можно увидеть, что на поверхности структуры № 3 такие области занимают не более 0.2% от общей площади. Кроме того, по результатам элементного анализа было

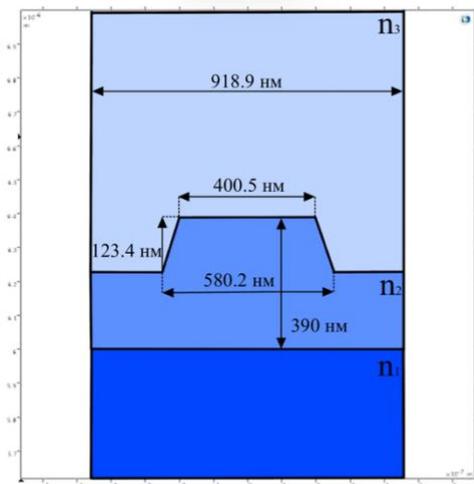
обнаружено, что на поверхности образца присутствует небольшое количество углерода. Данное обстоятельство можно объяснить как появлением органических загрязнений в процессе изготовления, так и тем, что перед нанесением резиста на поверхность было произведено напыление тонкой плёнки углерода для того, чтобы поверхность более устойчиво перенесла процесс экспонирования. Однако данная проблема не должна сильно отразиться на результатах эксперимента, поскольку концентрация углерода мала по сравнению с концентрацией оксида тантала и толщина углеродной плёнки на порядки меньше толщины слоя из Ta_2O_5 .

В данной главе приведена оценка параметров полученных структур современными методами исследования, которая позволила выбрать из шести изготовленных структур оптимальную для проведения эксперимента. Кроме того, по измеренным параметрам было проведено моделирование спектральных свойств метаструктур, которое описано в следующей главе.

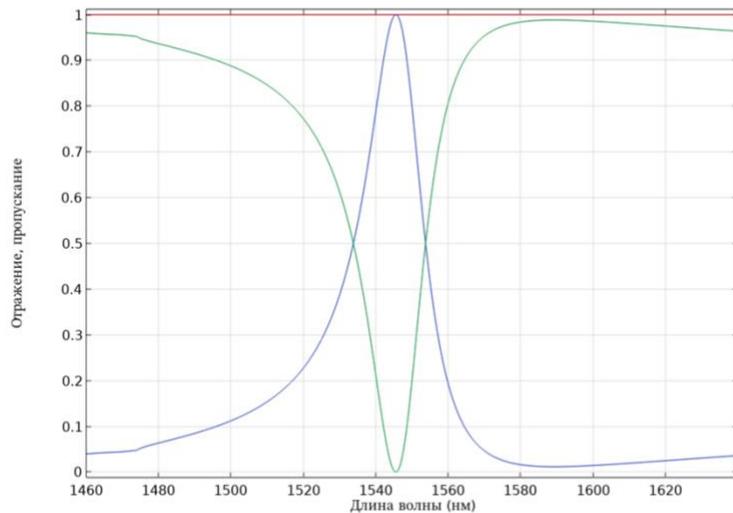
4 Моделирование свойств метаповерхности

В результате изготовления метаповерхности было получено шесть структур с различными параметрами решетки. Измеренные параметры для всех шести решеток приведены в главе 3. Для выбора оптимальной для проведения эксперимента структуры было необходимо подставить полученные значения в модель, описанную в [20]. Напомню, что главный критерий для выбора структуры заключался в следующем требовании: один из резонансных провалов (либо для ТМ, либо для ТЕ поляризации), соответствующий нормальному падению излучения на метаповерхность, должен был попадать в рабочую зону использовавшегося в эксперименте лазера (от 1521.88 нм до 1571.10 нм). Таким образом, в программном пакете Comsol Multiphysics была построена модель со следующими параметрами решетки: материал подложки – кварцевое стекло ($n_1 = 1.445$), материал основного слоя – Ta_2O_5 ($n_2 = 2.085$), материал среды – воздух ($n_3 = 1$), высота основного слоя 390 нм; глубина травления, период решетки, ширина штрихов (выступов) сверху и ширина штрихов (выступов) снизу для полученных структур приведены в Таб. 3. По результатам моделирования было показано, что оптимальной для использования в эксперименте метаповерхностью является структура № 3 со следующими параметрами: глубина травления (123.4 ± 1.9) нм, период решетки (918.9 ± 9.3) нм, ширина штрихов (выступов) сверху (580.2 ± 16.3) нм, ширина штрихов (выступов) снизу (400.5 ± 6.7) нм (Рис. 19а).

Результат моделирования приведён на Рис. 19б. Из него можно сделать вывод, что центр спектральной линии, соответствующий ТМ поляризации, располагается на длине волны 1544 нм, а ширина спектральной линии на полувысоте составляет 20 нм. Стоит отметить, что полученный спектр отличается от результата, полученного в главе 2.1, в связи с изменением профиля решетки метаповерхности с прямоугольного на трапециевидный и различием параметров решетки.



а)



б)

Рис. 19: Элемент метаповерхности (мета-атом) (а), полученные в результате моделирования спектры пропускания и отражения метаповерхности (б)

Таким образом, спектральная линия структуры № 3, соответствующая ТМ поляризации падающего нормально излучения, попадает в рабочую зону лазера.

5 Эксперимент

Целью эксперимента являлось измерение спектрального отклика изготовленной структуры № 3 при изменении ориентации плоскости поляризации падающего света. Полученные результаты были сравнены с теорией, приведенной в главе 1 (Рис. 8).

5.1 Экспериментальная установка

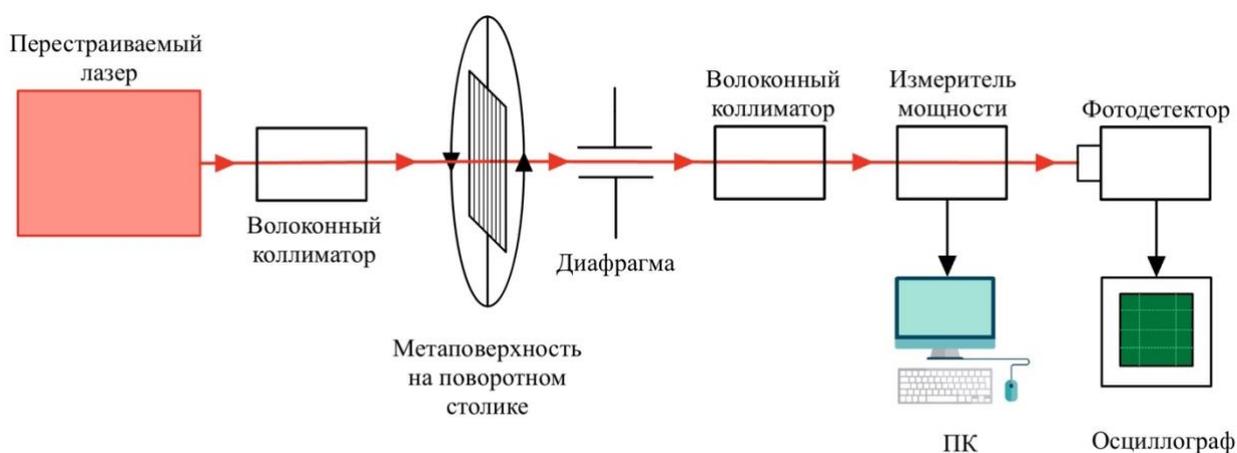
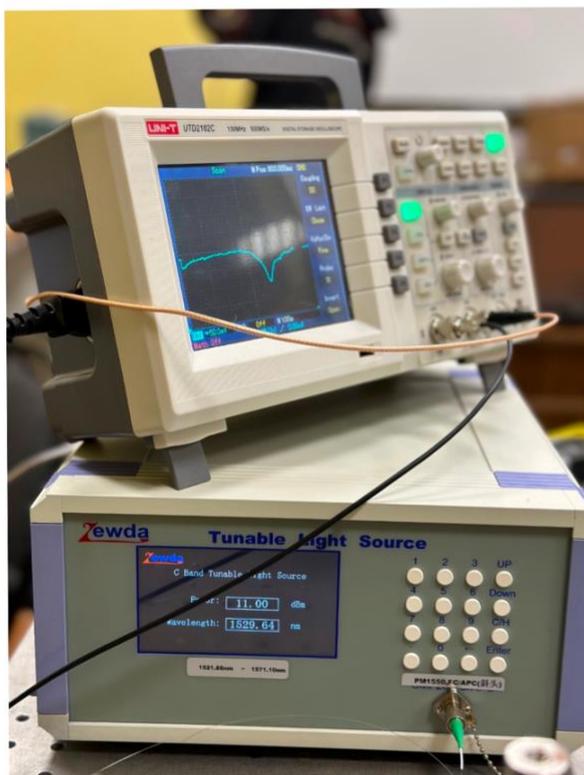


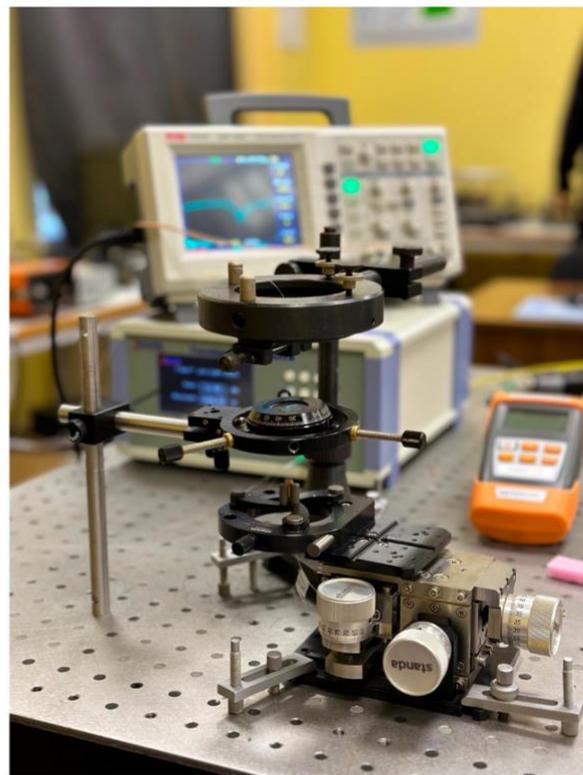
Рис. 20: Схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка проводимого исследования представлена на Рис. 20. В качестве источника излучения был выбран перестраиваемый лазер Zewda ZD8501C Tunable Light Source, имеющий линейную поляризацию на выходе. Диапазон длин волн лазера – от 1521.88 до 1571.10 нм. Оптическая ось установки была расположена вертикально. Излучение выводилось из лазера через волоконный вывод по оптоволоконному коллиматору. На выходе коллиматора пучок имел диаметр около 0.5 мм. Далее излучение падало на метаповерхность, расположенную на поворотном столике, позволяющем изменять углы поворота вокруг трёх ортогональных осей, с нанесенной шкалой для измерения угла поворота вокруг оси, параллельной направлению падения пучка. Далее пучок проходил диафрагму диаметром около 0.5 мм. Под диафрагмой был установлен оптоволоконный коллиматор, который заводил излучение в измеритель мощности. Измеритель мощности имел два выхода:

цифровой сигнал с первого выхода поступал на ПК (для записи зависимости мощности излучения от длины волны), оптический сигнал со второго выхода проходил на фотодетектор, который посылал электрический сигнал на осциллограф (для наблюдения за спектром в режиме реального времени). Для того чтобы обеспечить нормальное падение излучения на метаструктуру, между волоконным выводом лазера и волоконным коллиматором подключался циркулятор (не обозначен на Рис. 20), который заводил отраженное от участка подложки без метаструктуры излучение на измеритель мощности. Нормальное падение излучения на поверхность соответствовало максимальному значению мощности отраженного сигнала. Кроме того, для контроля положения метаповерхности к месту её установки на диафрагме подводился эндоскоп с увеличением 300х. На Рис. 21 представлены фотографии описанной установки.



а)



б)

Рис. 21: Фотографии экспериментальной установки: источник излучения и осциллограф (а), фотография метаповерхности, установленной на поворотном столике (б)

5.2 Результаты эксперимента

В результате проведённого эксперимента были измерены спектры прохождения излучения через метаповерхность при нормальном падении. Угол поворота метаповерхности относительно ориентации плоскости поляризации падающего излучения изменялся в пределах от 0° до 360° .

На Рис. 22 изображен спектр пропускания метаповерхности при повороте плоскости поляризации относительно оси OX на 180° .

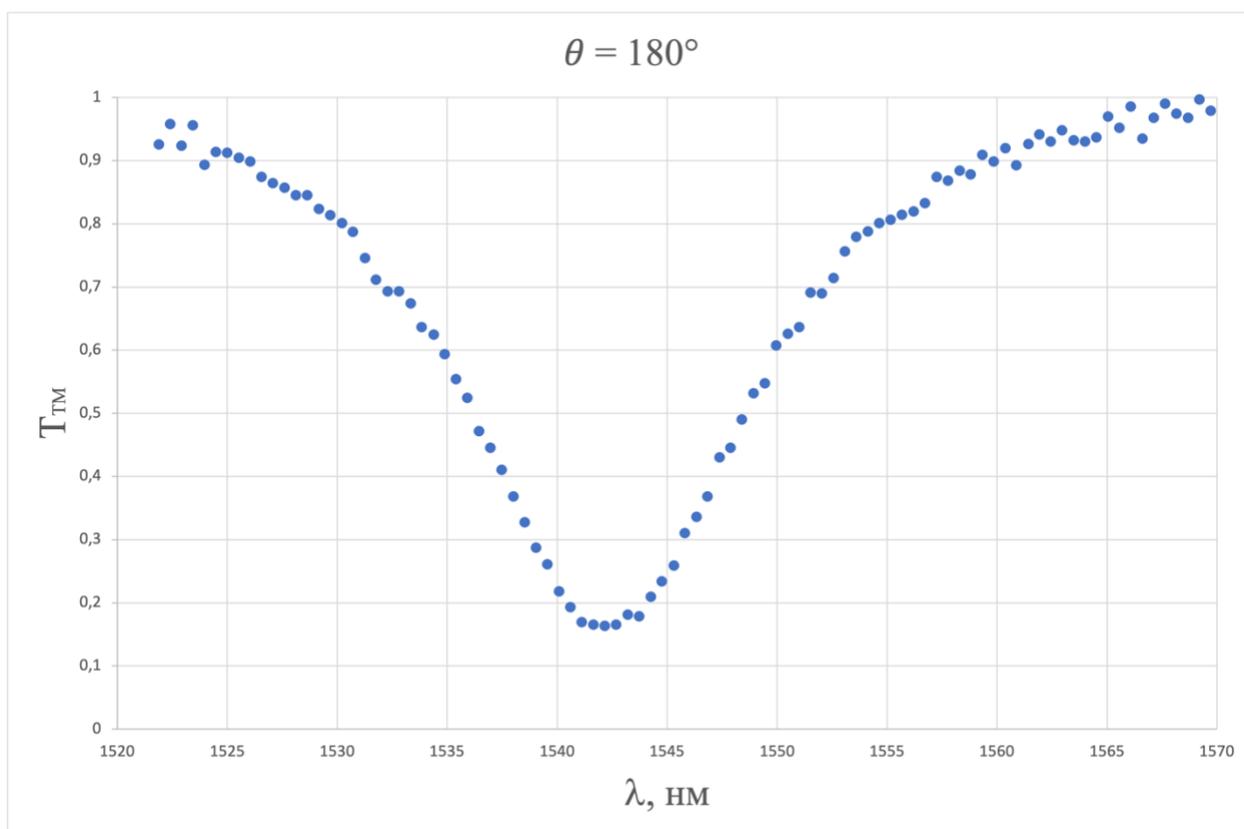


Рис. 22: Спектр пропускания метаповерхности при повороте ориентации плоскости поляризации относительно оси OX на 180°

Такое значение поворота плоскости поляризации соответствует минимальному пропусканию на резонансной длине волны. Как видно из полученного спектра, центр резонансной линии располагается на длине волны 1542 нм, что отличается от модели, приведенной в главе 4, на 2 нм. Ширина спектральной линии на полувысоте составляет 15 нм, что отличается от модели на 5 нм. Кроме того, можно заметить, что минимальное значение пропускания на резонансной частоте не равняется нулю (15.7% излучения проходят поверхность насквозь при резонансе). Это объясняется в первую очередь тем, что площадь

падения пучка на поверхность (πr^2 при $r = 0.25$ мм) превосходит площадь самой метаповерхности (a^2 при $a = 0.4$ мм) приблизительно на 18.5%. На Рис. 23 приведены полученные спектры для углов 90° (а), 135° (б), 170° (в), 190° (г), 225° (д) и 270° (е).

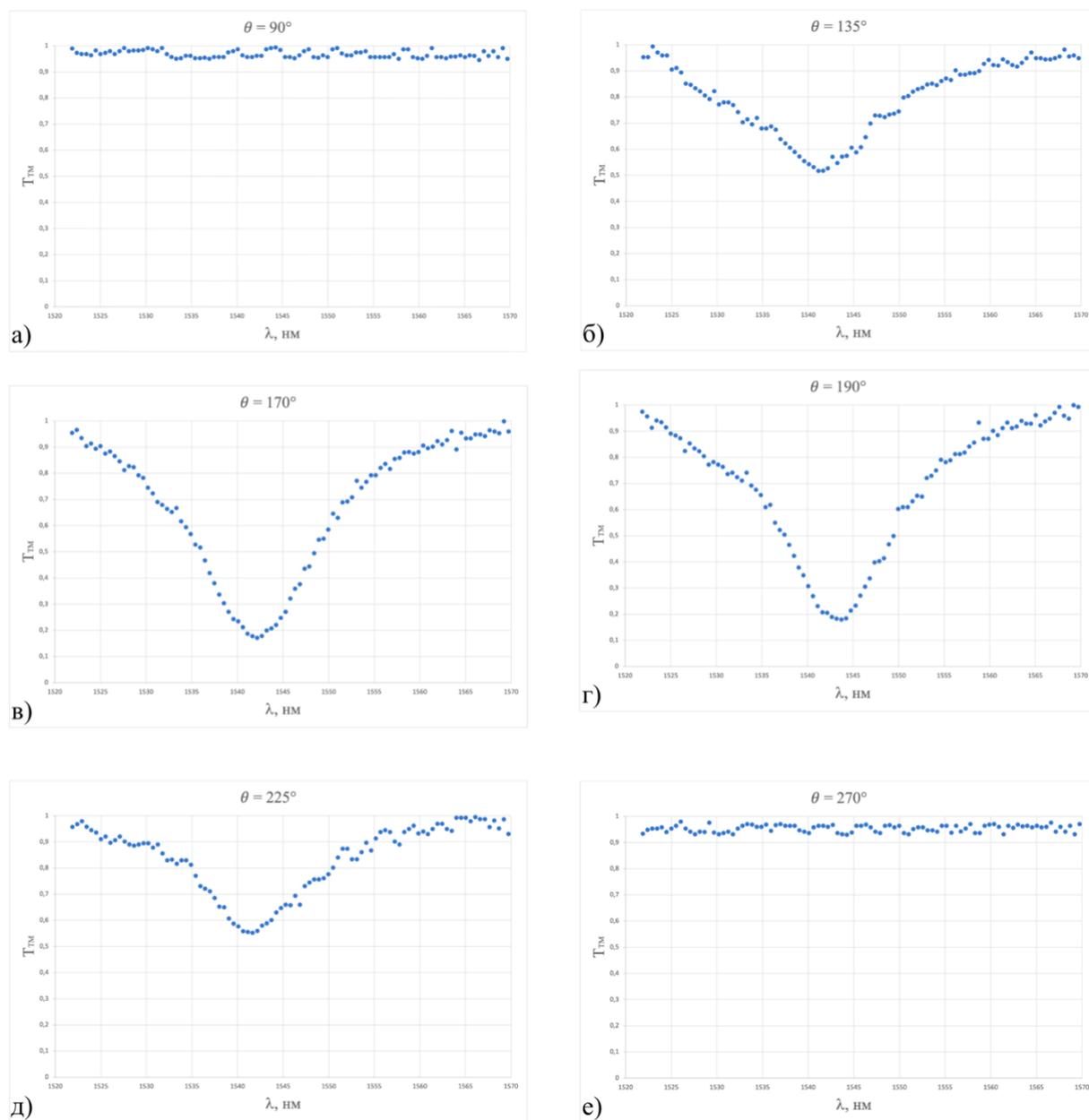


Рис. 23: Спектры пропускания метаповерхности при различных углах поворота ориентации плоскости поляризации

Полученные спектры хорошо согласуются теорией: при углах 90° и 270° пропускание максимально и резонансная линия, отвечающая ТМ поляризации не наблюдается. При углах 170° и 190° (близких к углу минимального пропускания (180°)) наблюдается резонанс, близкий к максимальному. При углах 135° и 225°

(отличающихся от угла минимального пропускания (180°) на 45°) интенсивность проходящего излучения при резонансной длине волны возрастает в несколько раз.

На Рис. 24а приведена экспериментально полученная зависимость коэффициента пропускания от угла поворота ориентации плоскости поляризации падающего излучения при резонансной длине волны (1542 нм). На Рис. 24б приведена теоретическая зависимость: $T_{TM} = \sin^2 \theta$.

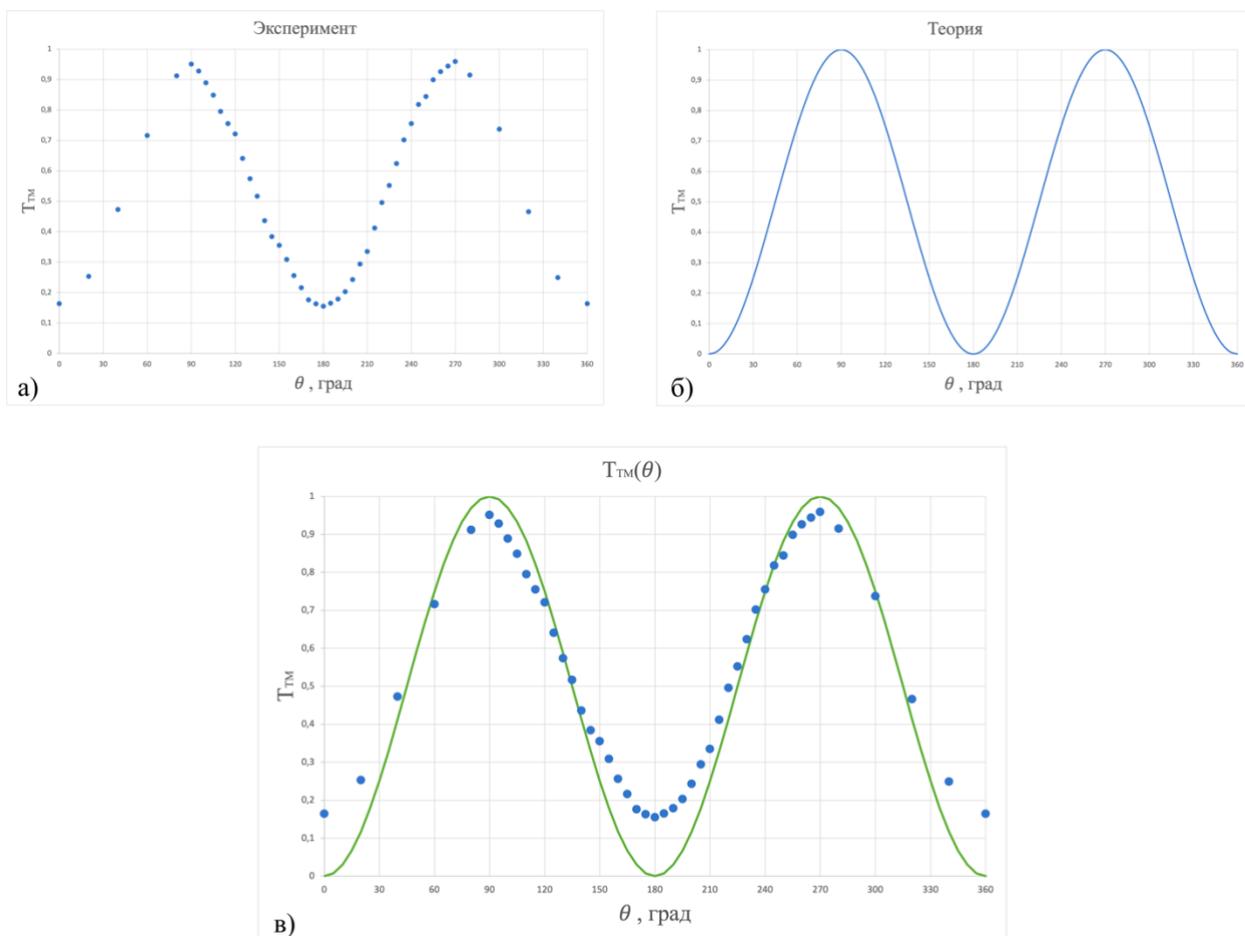


Рис. 24: Экспериментальные данные (а), теоретическая зависимость (б), сравнение эксперимента с теорией (в)

Сравнив теорию и эксперимент (Рис. 24в), можно убедиться, что для изготовленной структуры хорошо выполняется закон прохождения излучения сквозь метаповерхность при резонансе стелющейся моды. Главное несоответствие эксперимента и теории заключается в том, что при углах минимального пропускания ($0^\circ, 180^\circ, 360^\circ$) небольшое количество излучения проходит, что объясняется тем, что размеры падающего пучка превосходят

размеры метаповерхности. Кроме того, при углах максимального пропускания (90° , 270°) значение коэффициента пропускания не равняется единице. Это в первую очередь связано с рассеянием и дифракцией света на оптических элементах системы.

5.3 Выводы

В результате исследования спектрального отклика метаповерхности при изменении ориентации плоскости поляризации падающего излучения можно сделать следующие выводы. Во-первых, результаты эксперимента хорошо согласуются с теорией. Различия могут быть устранены усовершенствованием экспериментальной установки и получением более однородных параметров метаповерхности. Во-вторых, стоит отметить, что с помощью описанной метаструктуры можно также измерять спектральный отклик метаповерхности при различных углах падения излучения – в этом случае спектральная линия расщепится на две, и по величине расщепления можно будет определить угол наклона метаповерхности. Для одновременного определения угла поворота и двух углов наклона (относительно двух ортогональных осей) необходимо изготовить структуру, имеющую периодичность вдоль двух ортогональных осей. В целом, полученные в эксперименте данные позволяют заключить, что изготовленная метаповерхность может быть использована в качестве датчика угла поворота.

Главным результатом исследования является демонстрация возможности создания датчика угла поворота на основе наноструктурированной метаповерхности, размеры шкалы которого ($\sim 0,4$ мм) на порядок меньше минимальных размеров шкал аналогичных классических датчиков угла поворота (~ 5 мм). Стоит заметить, что размеры метаповерхности могут быть уменьшены ещё более чем на порядок, но для этого необходимо уменьшить диаметр падающего на метаповерхность пучка.

Заключение

В выпускной квалификационной работе описан полный цикл создания датчика угла поворота на основе наноструктурированной диэлектрической метаповерхности. Был пройден путь от теоретического описания проблемы до экспериментального воплощения. Важной частью исследования стало изготовление метаповерхности с помощью техники фотолитографии. Большая часть исследования посвящена анализу параметров полученных метаструктур. Для изготовленной структуры было проведено моделирование её спектральных свойств. Полученные в результате эксперимента данные были сравнены с теорией, после чего был сделан вывод, что изготовленная метаповерхность может быть использована в качестве датчика угла поворота.

В дальнейшем планируется продолжить исследование для более сложных структур с целью создания датчика угла поворота, способного измерять углы поворота относительно трёх ортогональных осей.

Благодарность

Автор выпускной квалификационной работы выражает благодарность ресурсным центрам СПбГУ за участие в исследовании. Нанесение (Глава 2.4) и удаление (Глава 2.6) литографической маски, анализ параметров структуры на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) (Глава 3.1) и элементный анализ методом рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) (Глава 3.3) были выполнены с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ «Нанотехнологии». Ионное травление слоя из Ta_2O_5 (Глава 2.5) было выполнено с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ «Нанофотоника». Анализ параметров структуры на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) (Глава 3.2) был выполнен с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ «Образовательный ресурсный центр по направлению физика».

Список литературы

1. Glybovski S. B., Tretyakov S. A., Belov P. A., Kivshar Y. S., Simovski C. R. Metasurfaces: From microwaves to visible // *Physics Reports*. – 2016. – Т. 634
2. Fleming W. J. Overview of automotive sensors // *IEEE Sensors Journal*. – 2001. – Т. 1, № 4. – С. 296-308.
3. Kaleg S., Muharam A., Kurniasih M., Hapid A. Evaluation of Potential Usage of Incremental-Type Rotary Encoder Application for Angle Sensing in Steering System // *Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*. – 2014. – Т. 5, № 2.
4. Iafolla L., Filipozzi M., Freund S., Zam A., Rauter G., Cattin P. Proof of concept of a novel absolute rotary encoder // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2020. – Т. 312.
5. Shi Y., Ni K., Li X., Zhou Q., Wang X. Highly accurate, absolute optical encoder using a hybrid-positioning method // *Opt. Lett.* – 2019. – Т. 44. – С. 5258-5261.
6. Kai E., Seitz P. Absolute, high-resolution optical position encoder // *Applied optics*. – 1996. – Т. 35, № 1. – С. 201-208.
7. Kshetrimayum R. S. A brief into metamaterials // *IEEE Potentials*. – 2004. – Т. 23, № 5. – С. 44-46.
8. Shelby R., Smith D., Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction // *Science*. – 2001. – Т. 292. – С. 77-79.
9. Kadic M., Bückmann T., Stenger N., Thiel M., Wegener M. On the practicability of pentamode mechanical metamaterials // *Appl. Phys. Lett.* – 2012. – Т. 100, № 19.
10. Shelby R. A., Smith D. R., Nemat-Nasser S. C., Schultz S. Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, left-handed metamaterial // *Applied physics letters*. – 2000. – Т. 78, № 4. – С. 489-491
11. Hu J., Bandyopadhyay S., Liu Y., Shao L. A Review on Metasurfaces: From Principle to Smart Metadevices // *Front. Phys.* – 2021. – Т. 8.

12. Yu N., Genevet P., Kats M., Aieta F., Tetienne J., Capasso F., Gaburro Z. Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction // *Science* – 2011. – T. 334. – C. 333-337.
13. Yang Y., Kravchenko I., Briggs D., Valentine J. All-dielectric metasurface analogue of electromagnetically induced transparency // *Nature communications* – 2014. – T. 5. – C. 5753.
14. Chen H., Taylor A. J., Yu N. A review of Metasurfaces: physics and applications // *Rep. Prog. Phys.* – 2016. – T. 79, № 7.
15. Efremova E. A., Nikolaeva, N. A., Shalymov E. V., Shoen V., Venediktov V. Y., Venediktova A. V. The main ways of applying nanostructured Metasurfaces in rotation angle sensors // *Optical sensors.* – 2019.
16. Quaranta G., Basset G., Martin O., Gallinet B. Recent Advances in Resonant Waveguide Gratings // *Laser and Photonics Review.* – 2018. – T. 12.
17. Wang S. S., Magnusson R. Theory and applications of guided-mode resonance filters // *Appl Opt.* – 1993. – T. 32, № 14. – C. 2606-13.
18. Boronakhin A. M., Efremova E. A., Shalymov E. V., Shalymov R. V., Venediktov V. Y., Venediktova A. V. Measurement of rotation angle by response of nanostructured Metasurfaces // *Advanced Sensor Systems and Applications IX.* – 2019.
19. Uddin M. J., Khaleque T., Magnusson R. Guided-mode resonant polarization-controlled tunable color filters // *Opt. Express.* – 2014. – T. 12, № 10.
20. Efremova E. A., Shalymov E. V., Venediktov V. Y., Zinchik A. A. Application of Metasurfaces to inclination angle measurement // *Advanced Sensor Systems and Applications X.* – 2020
21. Kang G., Tan Q., Wang X., Jin G. Achromatic phase retarder applied to MWIR & LWIR dual band // *Opt. Express.* – 2010. – T. 18, № 2. – C. 1695-1703.

22. Kazakova A. D., Larionov D. Y., Shalymov E. V., Shoev V. I. Influence of the Scale Slope on the Measurement of the Rotation Angle by the Response of Nanostructured Metasurfaces // Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. – 2022
23. Du J., Wu J., Zhao L., Song L. Coloration of Glasses by Space Ionizing Radiation // Journal of Inorganic Materials. – 2012. – T. 27, № 4. – C. 411-416.
24. Bright T. J., Watjen J. I., Zhang Z. M., Muratore C. Infrared optical properties of amorphous and nanocrystalline Ta₂O₅ thin films // Journal of Applied Physics. – 2013. – T. 114, № 2.
25. Pease F., Nixon W. C. High resolution scanning microscopy // Journal of Scientific Instruments. – 2002. – T. 42, № 2. – C. 80-100.
26. Salapaka S., Salapaka M. Scanning Probe Microscopy // Control Systems, IEEE. – 2008. – T. 28. – C. 65-83.
27. Cosslett V.E., Duncumb P. Micro-analysis by a flying-spot X-ray method // Nature. – 1956. – T. 177. – C. 1772-1173