

10. Новые возможности в области создания микро-наноструктурированных оптических и голографических компонентов и лазерных технологий микрообработки

В. П. Корольков, С. Л. Микерин, В. П. Бессмельцев, В. С. Терентьев, Д. А. Белоусов, И. А. Лобач, А. В. Достовалов

Институт автоматки и электротметрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Развитие прецизионных лазерных и плазменных технологий, подкрепленное улучшением функциональности и снижением погрешностей аналитических приборов, создает новые возможности в области синтеза микро-наноструктурированных оптических компонентов и продуктов прецизионной микрообработки. Выполнение серии проектов ФЦП, РНФ и РФФИ позволило создать в ЦКП ИАиЭ СО РАН комплекс оборудования, позволяющего решать широкий ряд прикладных и фундаментальных задач. В докладе показаны возможности отдельных компонентов этого комплекса и примеры их применения. Уникальность и доступность созданного технологического комплекса будут полезны для реализации российских и международных проектов в области голографии, интегральной и волоконной оптики, сенсорики и микро-системной техники.

Ключевые слова: Микро-наноструктурированные оптические компоненты, Лазерные технологии микрообработки, Прямая лазерная запись, Реактивное ионное травление, Атомно-силовая микроскопия, Оптическая рефрактометрия.

Цитирование: Корольков, В. П. Новые возможности в области создания микро-наноструктурированных оптических и голографических компонентов и лазерных технологий микрообработки / В. П. Корольков, С. Л. Микерин, В. П. Бессмельцев, В. С. Терентьев, Д. А. Белоусов, И. А. Лобач, А. В. Достовалов // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 66–73.

Введение

Расширение области применения оптических компонентов с поверхностным, объемным или одномерным (вдоль сердцевины оптического волокна) микро-наноструктурированием во многих отраслях промышленности, особенно, таких как лазерные технологии, оптическая связь, приборостроение и биомедицина требуют дальнейшего развития технологий и оборудования для их производства. Существенная часть технологий создания оптических элементов с микрорельефом основана на применении лазерного излучения и плазменных процессов обработки. Проблема не исчерпывается только технологическим оборудованием. Необходимы современные приборы для характеристики исходных материалов и изготавливаемых элементов. Требования к технологическому и аналитическому оборудованию ужесточаются в

виду явной тенденции последних лет к широкому применению высокоапертурных дифракционных оптических элементов (ДОЭ), субволновых структур [1], метаматериалов и мета-оптики [2].

1. Технологическое оборудование

Развитие в ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН комплекса микротехнологического и аналитического оборудования и компетенций для выполнения НИОКР полного цикла с выпуском, как экспериментальных образцов, так и мелких серий компонентов волоконной и интегральной оптики, нанофотоники, микрооптики, дифракционной оптики, высокоточных синтезированных голограмм создает площадку для апробации и освоения приборостроительными и высокотехнологичными предприятиями Сибири и Дальнего Востока новых технологий в связке с новым оборудованием. В перспективе это будет способствовать увеличению числа экологически чистых перерабатывающих производств (индустрии фотоники и телекоммуникаций, приборостроению, а также отраслям промышленности, работающим над решением задач повышения безопасности страны, улучшения качества жизни и здоровья граждан). К настоящему времени в России назрела острая потребность к опережающему развитию в областях, связанных с нано-/микро-технологиями — интегральной оптике, нанофотонике и микросистемной технике.

Разработка и изготовление новых типов голограмм, оптических сенсоров, в том числе на основе метаматериалов, требуют современного сверхточного оборудования, в том числе для литографии криволинейных элементов с гладкими границами (гладкость границ напрямую влияет на потери света при распространении по волноводам и взаимное влияние сигналов в соседних волноводах). Поперечные размеры волноводов в интегрально-оптических устройствах оптического диапазона спектра составляют 1–10 мкм при размере устройств до 10 см. Характерные размеры элементов наноструктуры метаматериалов для ближнего ИК диапазона имеют размер порядка сотен нанометров. Характерный размер плазмонных структур для оптического и ближнего ИК диапазонов составляет от 1 мкм и менее.

Для выполнения разработок в этих областях в ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН в рамках выполнения гранта ФЦП на модернизацию оборудования закуплена лазерная литографическая установка DWL-66+ (рисунок 1а) версии HighRes производства Heidelberg Instruments GmbH [3]. Выбор данной установки обусловлен преимуществами перед электронно-лучевой литографией, заключающимися в значительно меньшей стоимости, большей скорости записи структуры, меньшими требованиями на условия эксплуатации и расходами на содержание. Данный лазерный литограф работает в режиме XY-позиционирования и векторного перемещения. При дискретности позиционирования лазерного пятна 5 нм и диаметре пятна 300 нм достигается более качественное изготовление протяженных элементов микроизображения. Данный литограф обладает высокой точностью и воспроизводимостью, а также расширенным полем записи (200×200 мм). Разрешающая способность системы позиционирования литографа и минимальный размер формируемых микроэлементов до 300 нм

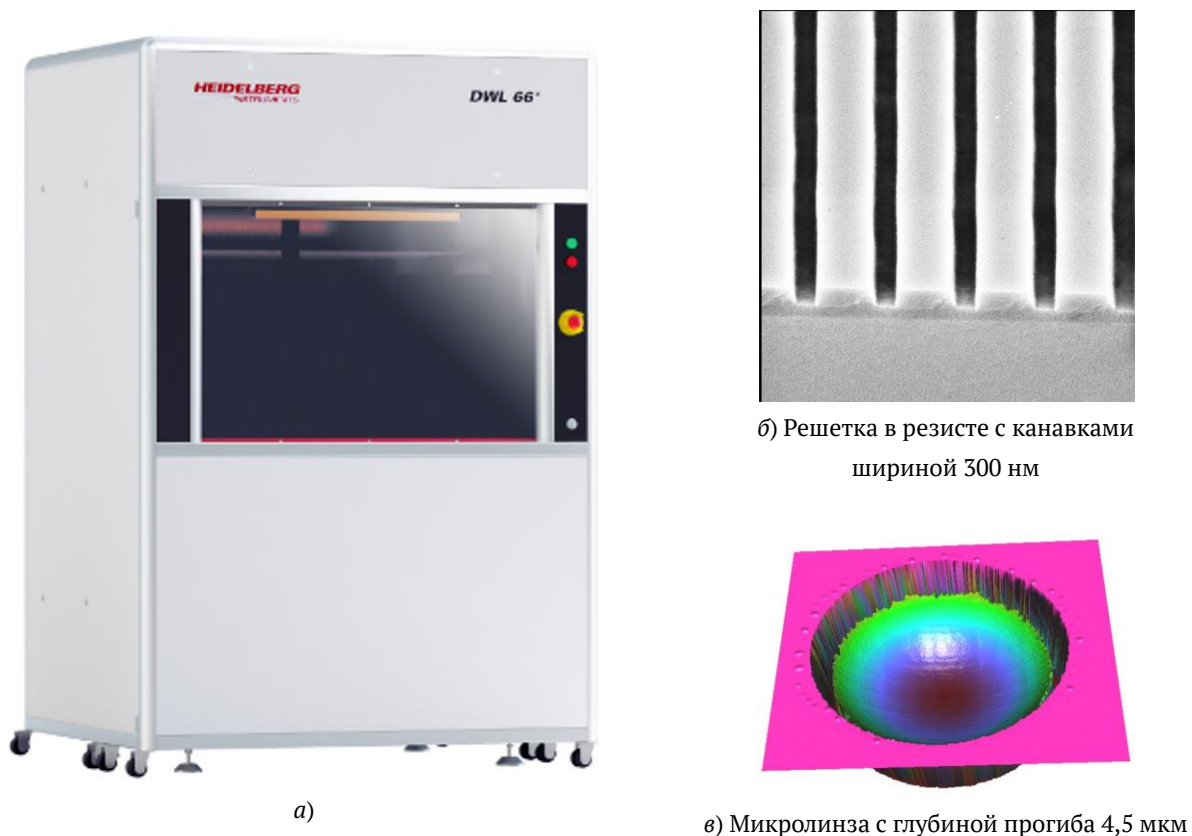


Рис. 1. Лазерная литографическая установка DWL66+ HiRes (а) и образцы микрорельефа в фоторезисте, сформированные с ее помощью

удовлетворяет самым жестким требованиям к интегрально-оптическим устройствам мирового уровня, как и метаматериалам и плазмонным структурам для области ближнего ИК диапазона. Установка DWL 66+ HiRes позволяет изготавливать как бинарные (рисунок 1б), так и многоуровневые (рисунок 1в) микроструктурированные оптические элементы.

В рамках проекта РФФ «Развитие сверхразрешающей термохимической лазерной технологии формирования компьютерно синтезированных дифракционных наноструктур» создан и передан в ЦКП «Спектроскопия и оптика» сканирующий X-Y лазерный нанолитограф (ЛНЛ) [4], ориентированный в отличие от DWL66+ на проведение исследований термохимической лазерной записи на тонких пленках металлов, требующих существенно более высокой мощности лазерного пучка. Установка, показанная на рисунке 2а, использует мощный диодный лазер с длиной волны 405 нм. На рисунке 2б показан образец решетки с периодом 900 нм, записанный на пленке циркония с помощью ЛНЛ.

Для переноса сформированных в фоторезисте структур в материал подложки используется установка плазмохимического реактивно-ионного травления с источником высокоплотной плазмы «Плазма ТМ 200-01» (рисунок 3) производства НИИТМ [5]. Она обеспечивает возможность травления кварцевых и кремниевых подложек диаметром до 200 мм при их толщине до 20 мм. При этом неравномерность травления не хуже 5%. Травление может осуществляться через хромовую или фоторезистную маску.

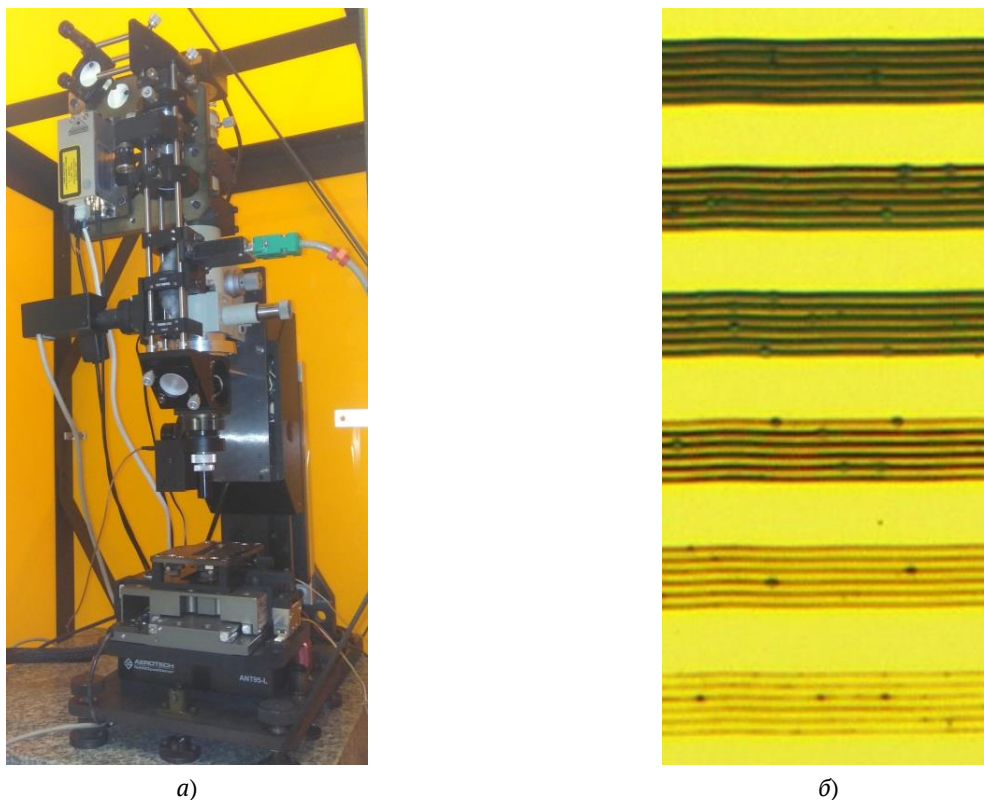


Рис. 2. XY лазерный нанолитограф (а) и тестовая структура с периодом 900 нм, записанная с его помощью на пленке Zr (б)



Рис. 3. Установка реактивно-ионного травления «Плазма ТМ 200-01»

2. Аналитическое оборудование

Высокоточное и воспроизводимое изготовление синтезированных голограмм, волноводных и интегрально-оптических компонентов невозможно без характеристики поверхностного микрорельефа и материалов, из которых они изготовлены. Измерение профиля поверхности



Рис. 4. Автоматизированный атомно-силовой микроскоп PARK XE15

с нанометровым разрешением обеспечивается атомно-силовым микроскопом PARK XE15 (рисунок 4) [6]. Отличительной особенностью этого прибора является возможность измерения в автоматическом режиме серии образцов или тестовых структур, распределенных в поле до 150×150 мм. Область каждой измеряемой структуры достигает $100 \times 100 \times 12$ мкм.

Для одновременного измерения основных оптических параметров и толщины слоев оптических материалов обычно прибегают к спектральной эллипсометрии. Однако, эффективность этого метода сильно зависит от расчетной модели измеряемой среды и знания основных параметров подслоев. Существует метод измерения параметров слоев оптических материалов, который основан на возбуждении оптических мод в планарной волноводной системе. Этот метод особенно подходит для задач интегральной оптики, к тому же не требует знания свойств материалов подслоев, имеет на порядок более высокую точность измерения показателя преломления. В ЦКП «Спектроскопия и оптика» данный метод измерения реализуется на приборе производства фирмы Metricon Inc. (США) модель 2010/M (рисунок 5) [7]. Погрешность измерения показателя преломления материала слоя не хуже 0,001.

В ЦКП «Спектроскопия и оптика» собран комплекс оборудования для создания волоконно-оптических компонентов. Совместно с НГУ создана фемтосекундная лазерная установка для записи брэгговских решеток [8]. Одним из самых мощных инструментов для неdestructивного анализа волоконно-оптических систем является оптическая рефлектометрия. Среди всех технологий, основанных на принципах оптической рефлектометрии можно отметить только три, которые позволяют получать миллиметровое пространственное (т. е. вдоль распространения излучения) разрешение: частотная рефлектометрия рэлеевского рассеяния света; временная рефлектометрия рассеяния Мандельштама-Бриллюэна с предварительным импульсом; корреляционная рефлектометрия рассеяния Мандельштама-Бриллюэна. Эти ме-

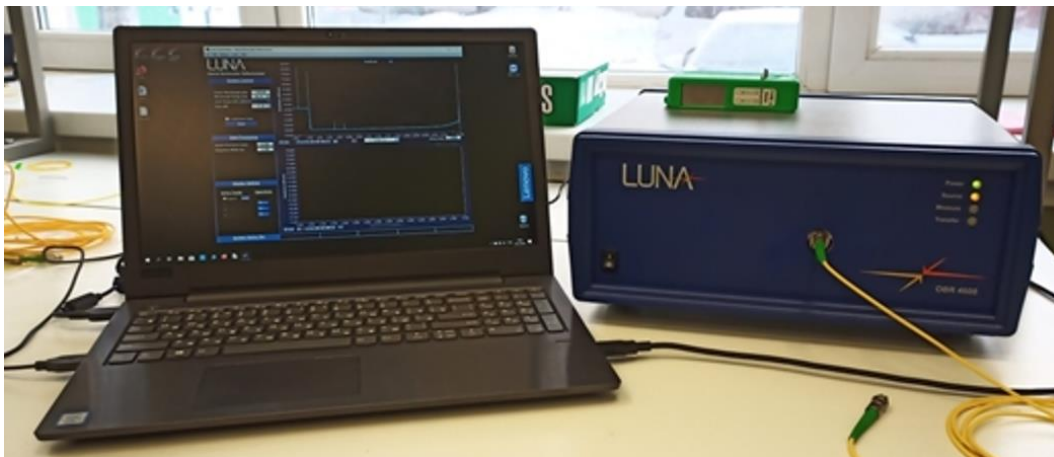


Рис. 6. Рефлектометр высокого разрешения OBR 4600

тоды измерения реализованы в ЦКП «Спектроскопия и оптика» на оптическом рефлектометре OBR 4600 (рисунок 6) производства Luna Technology [9]. Данный прибор позволяет характеризовать с высоким разрешением волоконно-оптические датчики растяжения и температуры на основе брэгговских решеток.

Новым важным направлением исследований в ЦКП «Спектроскопия и оптика» является развитие методов прецизионного 3D прототипирования металлических деталей с помощью наплавления и спекания материалов под действием лазерного излучения. Эта технология является весьма востребованной в современной промышленности. Формообразование изделий сложной формы с внутренними пустотами в одном цикле существенно уменьшает количество деталей в изделии, сокращает время изготовления узла и, как следствие, позволяет быстро окупить затраты на приобретение оборудования и порошковых материалов. Однако аддитивная технология для конкретных изделий нуждается в существенной доработке и совершенствовании. Необходимо обеспечить точный in-situ контроль параметров процесса для каждого из используемых порошков, анализ изделий, как по геометрическим, так и прочностным параметрам, создание точных моделей процесса для предварительного моделирования. Кроме того, применение керамических (особенно высокотемпературных) и высокотемпературных металлических порошков для послойного аддитивного формообразования в настоящее время развито существенно хуже. Это связано с особенностями процесса формирования слоя, спекания и сплавления таких порошков, особенно с нанометровыми кристаллитами, с низкой сыпучестью и необходимостью для таких процессов сверхвысоких температур и инертной окружающей атмосферы. Для реализации указанных требований ИАиЭ СО РАН разработал установку прецизионной 3D печати на основе одновременного и согласованного применения двух источников мощного лазерного излучения с существенно отличающимися длительностями взаимодействия с обрабатываемым материалом (микросекундный (500 Вт) и фемтосекундный (20 Вт) диапазоны). Кроме этого, в установке используются средства калибровки технологического процесса на основе анализа теплового распределения в образце в реальном времени и математическое обеспечение для динамической коррекции режимов обработки. Прецизионные механические компоненты, сформированные на данной

установке, могут использоваться в широком круге задач от микросистемной техники до моторостроения.

Заключение

В результате выполнения проектов ФЦП, РНФ, РФФИ в ЦКП «Спектроскопия и оптика» создана экспериментальная база и обеспечена поддержка выполнения НИОКР полного цикла для достижения в ближайшей перспективе ряда прорывных результатов:

- технологии изготовления различных видов волоконно-оптических и интегрально-оптических устройств;
- прототипы сверхбыстродействующих фотонных модулирующих и переключающих устройств;
- уникальные внеосевые синтезированные голограммы для контроля и юстировки оптических систем космического мониторинга и систем дополненной реальности двойного назначения;
- лазерные аддитивные технологии 3D-синтеза изделий из тугоплавких (керамика, металлы) и композиционных материалов с использованием микро- и нанопорошков;
- лазерные технологии записи волноводных структур показателя преломления в различных прозрачных материалах (кристаллы, стекла, полимеры, керамика) и элементов интегральной фотоники и фотонных интегральных микросхем на основе этой технологии;
- лазерные технологии записи 1D–3D периодических структур показателя преломления в различных типах волноводов (волоконные, планарные и объемные) с передовыми характеристиками (оптические, механические, эксплуатационные) для применений в передовых технологических лазерных и сенсорных системах.

Создание современной технологической базы в Новосибирском Академгородке для проведения исследований и мелкосерийного производства микроструктурированных оптических компонентов и прецизионных узлов сложной 3D конфигурации на мировом уровне отвечает не только российскому, но теперь уже и современному мировому тренду по локализации и импортозамещению комплектующих, когда международные взаимосвязи могут быть неожиданно разорваны из-за противозидемиологических мероприятий или санкций. Общедоступное современное оборудование, эксплуатируемое высококвалифицированным персоналом, будет также полезно для реализации комплексных научно-технических программ в области разработки и изготовления заказных компонентов фотоники, оптического приборостроения, телекоммуникационной техники, биомедицинских сенсоров и микросистемной техники.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке грантов ФЦП (соглашение №075-15-2019-1642 от 5.11.2019) и РНФ №17-19-01721-П, а также с использованием оборудования ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН.

Список источников

- [1] **Glaser, T.** High efficiency binary phase-transmission-grating / T. Glaser, S. Schroter, H. Bartelt, R. Pohlmann, H. Fuchs // EOS Topical Meeting Digest Series. Diffractive Optics. — 1997. — Vol. 12. — P. 32.
- [2] **Kruk, S.** Nonlinear and topological meta-optics / S. Kruk, Y. S. Kivshar // Active Photonic Platforms XI. International Society for Optics and Photonics. — 2019. — Vol. 11081. — P. 110810S.
- [3] Лазерная литографическая установка DWL-66+ / URL: heidelberg-instruments.com/en/products/dwl-66.html.
- [4] **Корольков, В. П.** Оптимизация оптического канала X-Y лазерного нанолитографа для записи на фото- и термочувствительных материалах / В. П. Корольков, А. Г. Седухин, А. Е. Качкин, А. Е. Елисафенко // Интерэкспо Гео-Сибирь. Национальная конференция с международным участием «СИБОПТИКА-2019». — 2019. — Том 8. — С. 28–33.
- [5] Установка плазмохимического реактивно-ионного травления «Плазма ТМ 200-01» / URL: niitm.ru/плазма-тм-200-01/.
- [6] Атомно-силовой микроскопом PARK XE15 / URL: parksystems.com/products/large-sample-afm/park-xe15/overview.
- [7] 2010/M Metricon / URL: www.metricon.com/model-2010-m-overview.
- [8] **Wolf, A. A.** Femtosecond writing of refractive index structures in multimode and multicore fibres / A. A. Wolf, A. V. Dostovalov, S. Wabnitz, S. A. Babin // Quantum Electronics. — 2018. — Vol. 48. — № 12. — P. 1128–1131.
- [9] Рефлектометр Luna OBR 4600 / URL: lunainc.com/product/sensing-solutions/obr-4600/.