

Лазер и измерительная техника

Лазер — революционное изобретение, которое во многом определило ход развития науки во многих областях. Особенно это относится к оптической измерительной технике. Дело в том, что такие технические характеристики лазеров, как высокая монохроматичность («спектральная чистота»), малая (дифракционного порядка) расходимость и высокая интенсивность излучения имеют для неё принципиальное значение.

Именно лазер не только «разморозил» ряд научных направлений и придал им мощнейший импульс, но и способствовал появлению новых. Прежде всего, это касается интерферометрии с большой разностью хода (10—100 м), голографической интерферометрии трёхмерных объектов в статике и динамике (применительно, прежде всего, к контролю деформаций), доплеровской анемометрии (измерение полей скоростей потоков, частиц), методов размерного контроля на основе идей Фурье-оптики (дифракционные, корреляционные, триангуляционной техники, методов структурного освещения и др. Более того, именно благодаря лазеру стало возможным создание изобретённых А. Ломаном цифровых голограмм — компьютерно-синтезированных дифракционных элементов, позволяющих воспроизвести различные световые распределения в виде сложных волновых фронтов с уникальными характеристиками. А это, в свою очередь, стимулировало появление нового класса измерительных систем для сверхпрецизионного контроля формы различных 3D объектов, в т.ч. таких крупногабаритных, как зеркала телескопов.

Все эти лазерные направления были поставлены и активно начали развиваться в Институте автоматизации и электротехники СО АН СССР с приходом в 1967 г. на пост директора д.ф.-м.н. Юрия Ефремовича Нестерихина.

В целом надо сказать, что в начале 70-х годов наступил «звёздный час» для лазерной измерительной техники, и одним из лидеров в этой области был, безусловно, ИАиЭ. Как сотрудник ИАиЭ в 1968—1987 гг. я был очевидцем и непосредственным участником реализации ряда «измерительных проектов».

Лазерные измерители перемещений: первые успехи

Руководителем работ по лазерной интерферометрии перемещений стал специалист «экстра-класса», энергичный и обаятельный к.т.н. Вольдемар Петрович Коронкевич. В 1968 г. под его руководством были созданы первые в СССР образцы лазерных измерителей перемещений ИПЛ-1. Идея таких измерителей основана на сложении двух лазерных пучков: одного от опорного объекта (призмы), а другого — от движущегося контролируемого объекта. В ИПЛ-1 и последующей модели ИПЛ-2 (1970 г.) разрешение составляло 0,1 мкм в диапазоне измерений перемещений от 0 до 1 метра. К производству промышленных образцов лазерных измерителей перемещений довольно быстро был подключен Новосибирский приборостроительный завод им. В.И. Ленина, на котором, начиная с 1973 г. было выпущено более 30 штук приборов (модель ФОР-1).

Если говорить о дальнейших успехах в создании лазерных измерителей перемещений, то нельзя не сказать об измерителе ИПЛ-10 (1975 г.), который в своё время в СССР имел рекордные характеристики (пределы измерений — до 45 м, разрешение — 0,01 мкм), что позволило впервые в отечественной практике решить ряд актуальных производственных задач. Так, в 1976 г. с помощью ИПЛ-10 были отъюстированы отсчётные шкалы крупногабаритного станка НСЗФ-2, созданного на Новосибирском заводе «Тяжстанкогидропресс» им. А.И. Ефремова. Использование этого прибора позволило в 8 раз повысить точность измерений и в 10—12 раз уменьшить время контроля. В эти же годы с помощью этой техники впервые была измерена непрямолинейность направляющих станков с большим ходом (до 20 м) в Ивановском станкостроительном производственном объединении им. 50-летия СССР.

Существенно, что в 80-е годы концепция построения лазерных измерителей перемещений претерпела радикальные изменения: вместо автономных приборов стали создаваться измерители модульного типа. Приборы этого класса сначала были созданы в ИАиЭ в 1976 г. (ЛИПП), а затем в СКБ научно-приборостроения (руководители работ — зав. лаб. к.т.н. В.А. Ханов и ведущий инженер В.М. Ведерников) в 1987 г. (ЛИПП-Д).

Смелый шаг

После посещения в США в 1975 г. фирмой Zenith Radio Corporation В.П. Коронкевич вознамерился создать отечественную систему для записи видеодисков. Началась кропотливая интенсивная работа по созданию уникальной системы, ядром которой, наряду с лазерной фокусирующей головкой и вращающимся шпинделем, был лазерный

измеритель перемещений, который задавал «метрику» (измерительную линейку с шагом в десятые доли длины волны). Именно с его помощью и контролировалось перемещение лазерной фокусирующей головки в диапазоне от 0 до 200 мм. Самое удивительное другое: по мере создания лазерного фото-построителя — генератора изображений — идея производства видеодисков отошла на задний план. На повестку дня встала «задача задач» оптики — синтез широкой гаммы оптических элементов начиная от амплитудных и фазовых масок до лимбов, шкал, голограмм, дифракционных элементов. Фактически речь шла о создании нового поколения оптических элементов с заданными амплитудными и фазовыми характеристиками, что было равносильно второй революции в оптике, связанной с переходом на новую элементную базу.

Несмотря на многочисленные научно-технические трудности, наконец-то «увидел свет» лазерный фотоплоттер. Уникальность его состояла в том, что благодаря работе в полярной системе координат (вращение подложки + радиальное перемещение записывающей головки) он отличался высокой производительностью записи информации (в отличие от известных, работающих в декартовой системе координат). На основе прототипа этой машины в КТИ НП совместно с ИАиЭ была разработана и создана коммерческая экспортная модель CLWS-300 (руководитель от КТИ НП д.т.н. В.П. Кирьянов).

У данной разработки — счастливая судьба. CLWS поставлены по контрактам не только в зарубежные ведущие оптические центры (Германия, Италия, Китай). Она востребована и в России. Генераторы «трудятся» и на Уральском оптико-механическом заводе, и на предприятии «Геофизика-Космос».

Покорение асферики

Второе научное направление, зародившееся в недрах лазерно-интерференционной тематики — сверхпрецизионный контроль формы асферических зеркал телескопов на основе дифракционных оптических элементов — компьютерно-синтезированных голограмм (лазерная нанометрология асферических поверхностей). Эти работы в своё время были поставлены в ИАиЭ по инициативе всё того же В.П. Коронкевича. Дифракционные элементы синтезировались с помощью лазерного генератора изображений в ИАиЭ. Эта тематика в течение многих лет интенсивно развивается в коллективе под руководством д.т.н. А.Г. Полещука.

Приведу лишь два примера. Первый из них относится к контролю зеркал телескопа большого бинокулярного зеркала LBT с диаметрами зеркал 8,4 м (совместно с Аризонским университетом). Компьютерно-синтезированная голограмма используется для контроля так называемых нуль-корректоров (сложных оптических систем с апертурой 0,5 м и более), с помощью которых производится оценка качества волнового фронта телескопа.

Другой пример применения компьютерно-синтезированных голограмм — контроль внеосевого сегмента зеркала гигантского Магеллановского телескопа СМТ, состоящего из 7 сегментов с диаметрами 8,4 м. Здесь производилось уже прямое сравнение образцового (требуемого) волнового фронта, воспроизводимого голограммой, с реальным волновым фронтом от зеркала телескопа.

На заре лазерного размерного контроля

Работы в области лазерного бесконтактного контроля геометрических параметров объектов родились по инициативе автора в лаборатории оптической обработки информации (зав. лаб. к.т.н. П.Е. Твердохлеб) в 70-е годы. Толчком для них послужило установившееся тесное сотрудничество между ИАиЭ, НПЗ им. В.И. Ленина и ЦКБ «Точприбор», инициаторами которого были директор ИАиЭ чл.-корр. Ю.Е. Нестерихин и директор завода Б.С. Галушак. В кратчайшие сроки в рамках созданного в ЦКБ «Точприбор» межотраслевого конструкторского отдела (МКО) были разработаны и созданы, а также впервые в СССР освоены промышленный выпуск лазерных дифракционных измерителей ЛДИ-1 (руководители работ от ИАиЭ — к.т.н. Ю.В. Чугуй, от МКО — к.т.н. Р.М. Бычков).

Принцип действия ЛДИ основан на использовании для измерения размера объекта его дифракционной картины Фраунгофе-

ра, формируемой в задней фокальной плоскости линзы, установленной за ним. Изменяя параметры картины, можно вычислить требуемые геометрические параметры объекта. Этот прибор оказался весьма востребованным на этапе становления отечественной волоконной промышленности. Например, на Лыткаринском заводе оптического стекла применение ЛДИ в цепи обратной связи позволило путём управления скоростью намотки волокна на бобину значительно улучшить качество волокон (однородность по диаметру).

Ещё одним интересным применением ЛДИ был автоматический бесконтактный контроль параметров резьбы ходовых винтов микроскопов БМИ и ММИ, выпускаемых серийно на НПЗ им. В.И. Ленина (взамен существующего метода с использованием микроскопов). Измерению подлежат характерные параметры спектра Фурье резьбы винтов, исходя из которых вычислялся шаг и средний диаметр винта. Прибор был внедрён на заводе. Следует отметить, что приоритет в этой области принадлежит нам (результаты этих работ впервые были опубликованы в журнале Applied Optics).

«Метрологическая революция» в атомной отрасли

Работам в области размерного контроля был придан серьёзный импульс благодаря созданию отраслевой лаборатории технического зрения (ОНИЛ ТЗ), организованной в 1987 г. совместным приказом председателя СО АН СССР академика В.А. Коптюга и Министра Минатома СССР Л.Д. Рябева (руководитель лаборатории к.т.н. Ю.В. Чугуй). Созданию лаборатории предшествовал большой успех во внедрении на НЗХК лазерного измерителя для бесконтактного контроля диаметров тепловыделяющих элементов ТВЭЛ. Это было равносильно, по словам руководителей Минатома, «метрологической революции» в атомной отрасли. С 1987 г. к этой тематике была подключена не только лаборатория ОНИЛ ТЗ (в 1991 г. была переведена из ИАиЭ в КТИ НП), но и часть подразделений СКБ (КТИ) НП. За последние 20 лет нами разработаны и созданы десятки новейших измерительных систем (некоторые из них не имеют аналогов в мире).

Остановлюсь на одной из них — лазерной измерительной машине для бесконтактного высокопроизводительного контроля геометрии дистанционирующих решёток с микронным разрешением. Первая модель её была внедрена в ОАО «НЗХК» в 2002 году в линии отладки технологического процесса производства решёток (руководитель м.н.с. В.В. Вертопрахов). Благодаря применению измерений на основе структурного освещения производительность её в 300 раз выше, чем у существующих координатно-измерительных машин. Цеховые технологи, получив в своё распоряжение уникальную информацию о геометрии изделия, заметно улучшили качество решёток. С 2010 г. в ОАО «НЗХК» запущена в промышленную эксплуатацию универсальная лазерная измерительная машина (руководители работ — к.т.н. Л.В. Финюгов и м.н.с. П.С. Завьялов), позволяющая измерять геометрию не только всех отечественных решёток, но и решёток западного дизайна. Ключевой элемент такой машины — дифракционный оптический элемент, который при его освещении воспроизводит ряд отстоящих друг от друга (вдоль оптической оси) узких колец, которые зондируют внутреннюю поверхность ячейки решётки и позволяют получить 3D модель отверстия ячейки. Дифракционный элемент проектировался и изготовивался нами с использованием всё того же генератора изображений CLWS-300С/М.

Лазер трудится

С появлением лазеров начались активные исследования в области создания лазерных триангуляционных измерителей для определения расстояния до объектов, что, в конечном счёте, позволяет получить информацию о геометрии трёхмерного объекта.

Приведу два примера разработок КТИ НП в этой области. Первый из них относится к железнодорожной отрасли — контролю геометрии колёсных пар на ходу поезда. Принцип измерения — триангуляционный. Подвижное колесо (область катания) зондируется лучом лазера. Рассеянный от поверхности колеса свет регистрируется сверхвысокоскоростным триангуляционным датчиком (ско-

рость обработки информации до 100 000 измерений в сек.). При использовании ряда датчиков, установленных в окрестности рельсов, удаётся измерить многие параметры колёсной пары, и прежде всего толщину гребня. Совокупность технических и программных средств созданной лазерной системы диагностики КОМПЛЕКС обеспечивают её устойчивое круглосуточное и круглогодичное функционирование при температуре плюс-минус 50° С и скорости движения поезда до 60 км/ч. Созданное нами с Западно-Сибирской железной дорогой малое предприятие (ОО «Центр новых технологий») поставило и внедрило на 15 железных дорогах России с 2002 года более 60 систем КОМПЛЕКС. Все они находятся в постоянной промышленной эксплуатации.

Другой пример эффективного использования лазерной триангуляционной техники — контроль формы крупногабаритных объектов в космической отрасли. Фирма ОАО «ИСС» им. академика М.Ф. Решетнёва поставила нам достаточно жёсткие условия: создать триангуляционный датчик, массогабаритные размеры которого в десятки раз меньше существующих и во столько же раз меньше его цена. И такой датчик нами был создан менее чем за год (руководитель проекта С.Н. Макаров). Уже несколько лет он успешно работает на российский космос.

Опора на научный базис

Приведу ещё два новых результата, связанных с поиском новых методов измерений, обеспечивающих выполнение не только метрологических характеристик, но и массогабаритных и стоимостных показателей. Нами исследован и разработан новый класс лазерных измерителей размеров на основе дифракции Френеля. Как известно, при освещении объекта лазерным пучком света на небольшом расстоянии от него (5–20 мм) при определённом условии формируется дифракционная картина Френеля. Измеряя характерные параметры этой картины, можно получить информацию об исходных размерах объекта. Так как проекционная оптика в такой системе отсутствует (роль оптического элемента выполняет свободное пространство!), то система потенциально оказывается весьма компактной и недорогой.

Второй результат получен совершенно неожиданным образом. Время от времени в процессе экспериментальных исследований, освещающая объект малого диаметра (до 100 мкм) расходящимся пучком света, мы получали странную картину: в центре её вместо ярко выраженного максимума наблюдался провал, причём структура картины довольно сильно отличалась от ожидаемой. При тщательном расчёте и анализе поля оказалось, что эта картина есть не что иное, как результат интерференции проходящей (сферической) волны и волны, дифрагировавшей на объекте, причём контраст картины в её центре зависит от размера объекта, который можно определить с большой точностью (с разрешением до 5 нанометров). Так зародилось новое направление, связанное с лазерной нанометрией непрозрачных объектов малых размеров.

Впереди — покорение «пиковершин»?

Каковы тенденции в области разработки лазерной измерительной техники для размерного контроля? Прежде всего, требуются измерители для контроля геометрии всё более сложных и сложных 3D объектов с непрерывно ужесточающимися требованиями к их метрологическим характеристикам + экстремальные условия эксплуатации техники. Фактически мы имеем дело с задачами типа «экстрим». Интеллектуализация, универсализация, расширение измерительного плацдарма в нанобласть — вот некоторые из этих тенденций. Не за горами и штурм «пико-области», что, на первый взгляд, противоречит всем канонам оптики. Но это лишь на первый взгляд. Для иллюстрации приведу один из результатов, полученных нами. В КТИ НП разработан и создан оптический нанопрофилометр с разрешением (при измерении высоты объекта) в 10 нанометров. Это стало возможным благодаря использованию в качестве опорного объекта в интерферометре Майкельсона атомно-гладкого зеркала, созданного в Институте физики полупроводников СО РАН (руководитель работ чл.-корр. РАН А.В. Латышев). Как говорится, «перекрёстное опыление» — в действии!

Ю.В. Чугуй,
директор КТИ НП СО РАН, д.т.н.