

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 4

1997

К 40-ЛЕТИЮ СО РАН

УДК 531.7 + 535.31 : 535.42 + 620.17915 + 681.32 : 681.17.18

Ю. В. Чугуй

(Новосибирск)

ИНФОРМАЦИОННЫЕ, ОПТИЧЕСКИЕ И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Подводятся основные итоги деятельности КТИ НП СО РАН в области информационных, оптических и лазерных технологий. Информационные технологии представлены результатами работ по рентгеновским панорамным и томографическим системам неразрушающего контроля качества тепловыделяющих элементов атомных реакторов. Содержание работ в области оптических технологий — оптическое восприятие трехмерных (3D) объектов и промышленный размерный контроль. Излагаются результаты, достигнутые при изучении дифракционных явлений на 3D-объектах с использованием конструктивного метода их расчета на основе эквивалентных диафрагм, а также при исследовании триангуляционных и теневых методов измерений на основе фотодиодных линеск. Приводятся технические характеристики созданных оптико-электронных измерительных систем. Лазерные технологии в КТИ НП СО РАН представлены результатами работ по созданию лазерных фотопостроителей (в том числе коммерческой модели, экспортируемой в развитые страны Европы), лазерных технологий субмикронного разрешения, а также технологических комплексов по лазерной резке, маркировке и считыванию технологической информации применительно к изделиям атомной энергетики.

**Введение.** В этом году исполняется 25 лет с момента создания первого в Сибирском отделении АН СССР Специального конструкторского бюро научного приборостроения (СКБ НП) как самостоятельной хозяйственной организации\*.

С 1972 по 1987 год деятельность СКБ НП СО АН СССР была сфокусирована в основном на решении актуальной в то время задачи, связанной с разработкой и созданием средств автоматизации научных исследований в части их конструкторской и производственной поддержки (научное руководство и функции головного института осуществлялись ИАиЭ СО АН СССР). В этот период в СКБ НП разработаны и созданы:

- документация почти на 100 типов модулей КАМАК широкой номенклатуры, выпускаемых в течение ряда лет Опытным заводом СО АН СССР;
- устройство вывода буквенно-цифровой и графической информации из ЭВМ на микрофильм «Карат», которое использовалось на многих предприятиях страны;
- фотограмметрический автомат «Зенит» и его модификации «Зенит-К», «Зенит-150» и система синтеза визуальной обстановки (совместно с ИАиЭ СО АН СССР);
- система управления крупнейшим в мире радиотелескопом РАТАН-600 (на основе технических средств КАМАК).

\* С 1962 по 1968 год СКБ НП входило на правах структурного подразделения в ИХКиГ СО АН СССР, а с 1968 по 1972 год — в состав ИАиЭ СО АН СССР.

В 1991 году по инициативе Президиума СО АН СССР (в целях сохранения конструкторско-технологической и производственной базы Отделения) СКБ НП (наряду с другими СКБ) было преобразовано в Конструкторско-технологический институт научного приборостроения (КТИ НП) в составе Объединенного института автоматики и электрометрии СО РАН.

Первые два года после преобразования в КТИ НП большинство работ велось в тесном сотрудничестве с ИАиЭ.

В рамках такого сотрудничества, в частности, разработаны и созданы:

- конструкторская документация и опытные образцы уникального измерительно-вычислительного комплекса для исследований тонкой структуры электронных сигналов статистическими методами в полосе частот до 250 МГц при частоте квантования до 100 МГц;

- компьютерная мини-система синтеза визуальной обстановки, по совокупности параметров (производительность до 2000 граней/кадр, двухцветная текстура  $32 \times 32$  и т. д.) на тот период не имевшая аналогов в стране (выпущена партия таких систем для различных предприятий);

- многопроцессорная система обработки изображений в реальном времени при потоке входной информации до 2,5 Мбайт/с;

- информационно-вычислительный комплекс в стандарте МЭК 821 для испытаний автомобильной электроники;

- базовые элементы информационно-вычислительных сетей с коммутацией пакетов на основе модулей VME-BUS.

Среди самостоятельных работ КТИ НП следует отметить разработку и создание стенда контроля электрических характеристик стартеров автомобилей. Стенд успешно прошел метрологическую аттестацию и сдан в промышленную эксплуатацию в АО «АвтоВАЗ» (Тольятти). По производительности, степени автоматизации он соответствует мировому уровню, что позволило отказаться от импорта аналогичных комплексов.

На рубеже 1988—1992 гг. в условиях резко сократившегося объема заказов возникла необходимость в радикальном обновлении тематики. Значительное внимание было уделено развитию лазерных и оптических технологий как наиболее перспективных направлений в деятельности Института.

Так, в 1988 году по инициативе ИАиЭ СО АН СССР начали развиваться работы по тематике, связанной с лазерными фотопостроителями субмикронного разрешения. Заметное ускорение их развития связано с организацией в СКБ НП в конце 1990 года отдела лазерных прецизионных систем и возложением на него задачи создания (совместно с ИАиЭ) конкурентоспособного образца лазерного фотопостроителя. В 1991 году в КТИ НП начаты работы в области оптического размерного контроля, выполняемые в лаборатории технического зрения. Затем в 1994 году была создана лаборатория лазерных промышленных технологий (субмиллиметрового разрешения) для развития работ по лазерной резке материалов и маркировке изделий. Основу лаборатории составили высококвалифицированные специалисты Новосибирского НИИ комплексного электропривода.

И наконец, в 1996 году на базе созданной совместно с ИАиЭ СО РАН лаборатории прикладной оптоэлектроники начата разработка технологий сепарации алмазов на новых физических принципах с использованием лазерного излучения и спектрального анализа (методы позволяют выявлять наиболее дорогие безазотные алмазы, что недоступно существующим технологиям).

Существенно, что в рамках указанных выше преобразований удалось наполнить новым содержанием работы в области такого традиционного для Института направления, как проблемно ориентированные компьютерные системы: в настоящее время они сконцентрированы на создании информационно-технологических систем для решения задач промышленного неразрушающего контроля и медицинской рентгенодиагностики.

Таким образом, за истекшие шесть лет с момента преобразования СКБ НП в КТИ НП СО РАН имело место существенное обновление его тематики. Во многом это стало возможным благодаря серьезным заказам со стороны

Министерства по атомной энергии РФ. Наличие в КТИ НП научного, инженерно-конструкторского потенциала и действующего опытного производства позволяет организовать замкнутый цикл (от НИР до опытного образца) по разработке и созданию оптико-электронных измерительных систем, рентгеновских систем неразрушающего контроля, лазерных технологических комплексов субмикронного, микронного и субмиллиметрового разрешений.

Ниже приведены основные результаты и перспективы деятельности Института в указанных выше направлениях.

**Информационно-технологические системы.** Данное направление представлено работами по развитию методов, алгоритмов и устройств неразрушающего контроля; новых информационных технологий медицинского назначения; систем управления технологическими процессами, а также работами в области экологического приборостроения.

В рамках сотрудничества с Минатомом РФ выполнен цикл работ по созданию и экспериментальной проверке цифровых рентгеновских систем контроля тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) трубчатого типа. Одна из таких систем, разработанная совместно с АО НЗХК (Новосибирск), в настоящее время проходит опытную эксплуатацию в цеховых условиях завода.

Завершена работа по созданию экспериментального образца рентгеновского томографа, предназначенного для контроля качества сварных соединений ТВЭЛ [1]. Томограф может использоваться как для реконструкции зоны шва по проекциям, так и для получения панорамных изображений. Полная реконструкция необходима для детального анализа причин брака [2].

В задачах контроля зачастую нет необходимости в полной реконструкции исследуемой области, достаточно лишь определить наличие или отсутствие дефектов в тонкой цилиндрической области, что позволяет использовать панорамную томографию. Панорамное изображение представляет собой развертку цилиндрической области заданного радиуса  $\sim 4,5$  мм и толщиной  $\sim 500$  мкм. Такое представление информации является наглядным и удобным для восприятия. Кроме того, панорамная томография обеспечивает высокое быстродействие, необходимое для контроля изделий в темпе технологического процесса (1 изд./мин). В качестве примера на рис. 1 представлено панорамное изображение реального изделия, на котором хорошо видны дефекты (воздушные поры).

Томограф прошел испытания в условиях заводской лаборатории АО НЗХК. В процессе испытаний использовались как специально изготовленные имитаторы ТВЭЛ, так и реальные образцы изделий. Испытания показали, что томограф обладает высокой обнаружительной способностью и позволяет в производственных условиях выявлять дефекты с характерными размерами менее 100 мкм.

Кроме того, в Институте совместно с НПФ РЕНСИ был выполнен цикл работ по созданию цифрового ортодентопантомографа на основе промышленно выпускаемых штативов, получены высококачественные томографические изображения стоматологических фантомов.

Эти работы имеют хорошие перспективы. Их развитие может идти по пути совершенствования как аппаратных, так и программных средств.

Что касается деятельности в области экологического приборостроения, то КТИ НП совместно с ПЭП «Сибэкоприбор» в течение нескольких лет выпускает инфракрасный спектрофотометр КН-1 для определения концентрации нефтепродуктов в сточных и природных водах (100 приборов в год). Этот



Рис. 1

прибор имеет достаточно устойчивый спрос. И тем не менее Институт начал в рамках специально созданного временного научно-технического коллектива разрабатывать новые версии специализированных инфракрасных спектрометров нового поколения. Уже создан цифровой спектрофотометр со встроенным микропроцессором (КН-2), имеющий возможность автокоррекции нулевого отсчета и способный работать на линии с ЭВМ, что существенно упрощает процесс измерений и повышает его конкурентоспособность. В настоящее время прибор готовится к государственным испытаниям.

Спектрометрические методы исследований находят применение и в медицине. В КТИ ИП по результатам выполненных исследований создана лазерная спектрометрическая аппаратура для ранней диагностики онкологических заболеваний на основе интегральной оценки светоиндуцированного излучения тканей тела человека. Комплект аппаратуры передан для клинических испытаний в Муниципальную легочно-хирургическую туберкулезную больницу (Новосибирск). Работы находятся в стадии создания медицинских методик (рекомендаций по использованию аппаратуры в целях диагностики тех или иных заболеваний) и совершенствования программного обеспечения.

**Оптические технологии.** Основу этого направления составляют исследования и разработки в области оптического восприятия трехмерных объектов (оптика 3D-объектов) и промышленного размерного контроля. Ниже представлены результаты, достигнутые при изучении дифракционных явлений на 3D-объектах, развитии триангуляционных и теневых методов измерения геометрических параметров объектов, а также сведения о созданных на их основе оптико-электронных измерительных системах.

*Расчет дифракционных явлений на 3D-объектах.* Для анализа особенностей формирования и фильтрации изображений и дифракционных картин Фраунгофера (пространственно-частотных спектров Фурье) типичных элементов непрозрачных тел (характерные размеры которых много больше длины волны света) впервые предложена и разработана конструктивная теория расчета дифракционных явлений в приближении Кирхгофа — Френеля на основе модели эквивалентных диафрагм (распределений) [3, 4]. Теория в отличие от известных (строгих и эвристических) проста, наглядна и вместе с тем достаточно точна для инженерных применений.

В частности, на основе конструктивного метода расчета (КМР) дифракционных явлений изучены в аналитическом виде (в классе френелевских функций) особенности формирования и высокочастотной фильтрации — оконтуривания (в когерентно-оптической дифракционно-ограниченной оптической системе) изображения типичного элемента трехмерных тел — протяженного симметричного края (длиной  $d$ ) с абсолютно поглощающей внутренней плоской гранью, перпендикулярной внешним граням объекта [5]. Показано, что влияние протяженности объекта на характер выходных распределений определяется параметром  $N = \theta_{кр}/\theta_{ап}$ , где  $\theta_{кр} = \sqrt{\lambda/d}$  — критический угол дифракции, при котором в полной мере проявляются объемные эффекты;  $\theta_{ап}$  — угловые размеры апертуры системы ( $\lambda$  — длина волны света). Установлено, что при  $N \gg 1$  эти эффекты выражены слабо и, наоборот, при  $N \ll 1$  они значительны.

Исследованы в аналитическом виде пространственно-частотные спектры абсолютно поглощающих объектов постоянной толщины (протяженный край, зазор), а также бипланарной щели. Установлены зависимости между характерными параметрами спектров и геометрическими размерами объектов. Предложены эффективные дифракционные способы одновременного определения по спектру объекта его поперечных и продольных геометрических размеров с погрешностями не хуже 0,1 и 1 % соответственно [5].

На основе КМР изучены особенности формирования спектров, а также высокочастотной фильтрации изображений абсолютно отражающего (металлического) протяженного симметричного края [4]. Теоретически и экспериментально показано, что при малой протяженности ( $N \gg 1$ ) профили изображений передней и задней грани объекта имеют вид двойного максимума с глобальным минимумом посередине (как и для случая плоского края с  $d = 0$ )

и незначительно отличаются друг от друга. Однако положение этого минимума вследствие протяженности объекта смещено относительно геометрического положения его края на величину, пропорциональную размеру зоны Френеля  $\sqrt{\lambda d}$ . В случае значительной протяженности ( $N \ll 1$ ) указанные профили вследствие виньетирования дифрагированных волн задней гранью и отсутствия на ней вторичной дифракции имеют вид одинарных максимумов, положение которых близко к геометрическому положению края объекта.

Полученные результаты обобщены для класса «серых» симметричных объектов (протяженный край и протяженная щель) [4] и несимметричного протяженного края (с углом скоса внутренней грани  $\theta_0$ ). Для последнего объекта установлено, что в случае абсолютно отражающей внутренней плоской грани вклад зеркальной составляющей поля существен при угле скоса объекта  $|\theta_0| > \theta_{кр} = \sqrt{\lambda/d}$ .

В результате анализа влияния конфигурации освещающей трехмерный объект волны установлено, что оно (в отличие от плоских объектов) носит принципиальный характер. Вид дифракционной картины и отфильтрованного изображения в значительной степени зависит от кривизны фронта и наклона освещающей волны, выбором которых можно усиливать или, наоборот, ослаблять вклад отдельных частей трехмерного объекта в результирующее поле спектра объекта.

В настоящее время ведутся исследования по разработке конструктивной теории формирования и фильтрации изображений и спектров цилиндрических металлических объектов, отверстий различной формы, изучается влияние степени пространственной и временной когерентности освещающего объекта пучка на формирование спектров и изображений (в том числе оконтуренных) трехмерных объектов. Перспективной представляется также разработка когерентно-оптических методов двумерной и трехмерной фильтрации типичных протяженных объектов с целью выделения их геометрических параметров.

В целом разрабатываемая конструктивная теория дифракционных явлений открывает новые возможности по созданию на ее основе оптико-электронных измерительных систем нового поколения для эффективного контроля трехмерных объектов с использованием когерентно-оптических методов обработки информации.

*Исследование триангуляционного метода измерений.* В настоящее время это один из распространенных оптико-электронных методов измерения расстояний до объекта в силу его простоты реализации [6]. Одна из первых моделей измерителя расстояний (лазерного щупа) на основе фотодиодной линейки, разработанного в КТИ НП в 1991 году, имела диапазон измерения расстояний до 25 мм и основную погрешность измерения 10 мкм (разрешение 1 мкм) при быстродействии до 30 Гц (измерений в секунду). На основе двух таких щупов был разработан и создан измеритель толщины ленты, переданный в НИИ АЧЕРМЕТ (Днепропетровск, Украина) для внедрения на металлургическом комбинате (Электросталь) в составе линии комплексного контроля параметров холоднокатаной ленты. Измеритель позволяет контролировать ленту толщиной до 10 мм с погрешностью не более 12 мкм.

Полученный опыт работы с лазерными щупами свидетельствует, что их применение на практике в немалой степени сдерживается большим уровнем погрешностей, возникающих при контроле объектов с так называемыми техническими поверхностями, которые имеют явно выраженные следы механической обработки. Поэтому усилия разработчиков были направлены на поиск способов улучшения точности триангуляционных измерений с учетом их функционирования в цеховых условиях (при наличии большого перепада температуры, пыли и т. д.), а также на разработку схемотехнических решений, обеспечивающих повышение быстродействия измерителей.

С целью снижения погрешности измерений в [7] исследована эффективность работы различных алгоритмов обработки выходных сигналов триангуляционных измерителей путем численного моделирования, а также в условиях их реальной работы с техническими поверхностями. В частности, установлено, что среди традиционных алгоритмов обработки наиболее

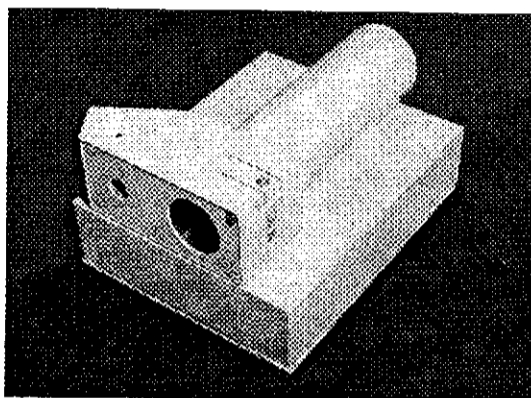


Рис. 2

оптимальным по точности и быстродействию является медианный алгоритм, обеспечивающий при правильном выборе параметров снижение погрешности в 1,5 раза. Дальнейшее снижение (более чем в 2 раза) пространственного шума, обусловленного анизотропией микроструктуры технической поверхности, достигается при использовании предложенной в КТИ НП бинокулярной схемы измерения. Исследовано также влияние на точность измерений степени когерентности и ширины освещающего поверхность зондирующего пучка, формы объекта и ориентации его поверхности. Показано, что при использовании частично когерентного зондирующего пучка погрешность измерений может быть уменьшена в 4—7 раз.

С учетом результатов выполненных исследований создана новая модель лазерного щупа (рис. 2). Благодаря применению современных сигнальных процессоров типа TMS-320 и скоростных специализированных интерфейсов удалось довести его быстродействие до 500 Гц. В отличие от предыдущей модели измеритель при тех же точностных характеристиках и диапазоне измерений позволяет работать с более широким классом поверхностей контролируемых объектов. Более того, он адаптирован для работы в цеховых условиях: его корпус выполнен пылевлагозащитным, заданные технические характеристики обеспечиваются при работе измерителя в диапазоне температур  $10 \div 45^\circ\text{C}$ .

Достигнутые результаты свидетельствуют о перспективности создания на основе триангуляционного метода измерений эффективных систем трехмерного контроля промышленных изделий.

*Развитие теневого метода измерений.* В отличие от получивших широкое распространение за рубежом лазерных измерителей сканирующего типа (на базе механических сканеров) разрабатываемые в КТИ НП теневые измерители на основе фотодиодных линеек (отечественного производства) значительно дешевле и надежнее в работе, что крайне важно при эксплуатации их в условиях отечественного производства [8]. Метод измерения предусматривает формирование теневого изображения объекта (с использованием светодиода в качестве источника света), последующее его электронное сканирование фотодиодной линейкой (с числом элементов 1024 и шагом 25 мкм) и обработку полученных данных микропроцессором или персональным компьютером. Основные усилия разработчиков были направлены на поиск путей снижения погрешностей измерений, обусловленных, во-первых, неточностью аппроксимации изображения края объекта при восстановлении его профиля (с гораздо большим разрешением, чем разрешение фотодиодной линейки), а во-вторых, остаточными aberrациями проецирующей оптической системы. Благодаря кубической аппроксимации профиля изображения края объекта и коррекции aberrационной характеристики объектива (с использованием предварительно полученных экспериментальных данных) общую погреш-

ность измерений удалось уменьшить до 2 мкм при скорости измерений до 200 Гц.

*Оптико-электронные системы размерного контроля.* Выполненные в период с 1991 по 1996 год исследования в области триангуляционных и теневых методов измерений позволили создать гамму измерителей размеров и внедрить их на ряде промышленных предприятий страны. Ниже кратко приводятся характеристики созданных систем.

1. Широкодиапазонный измеритель диаметров «Сенсор-В» предназначен для автоматических бесконтактных высокопроизводительных измерений внешних диаметров деталей (проволок, кабелей, труб и т. д.). Измеритель выполнен как автономный прибор с микропроцессорным управлением и обработкой данных. Результаты измерения диаметра и его сравнения с полем допуска отображаются на цифровом табло и могут передаваться по каналу RS-232. Логический сигнал «годен/брак» подается на выходной разъем. Большой диапазон измерений (от 0,5 до 65 мм) достигается за счет двухканального исполнения оптической системы. Разрешение системы 1 мкм, предел допускаемой погрешности  $\pm 5$  мкм, быстродействие 200 Гц.

2. Устройство бесконтактного непрерывного контроля внешних диаметров кабелей в процессе их производства состоит из трех датчиков (для измерения диаметров на трех производственных линиях одновременно) и микропроцессорного блока управления, позволяющего оперативно поддерживать оптимальные параметры работы линии. Быстродействие устройства 100 Гц, погрешность измерения диаметров (до 5 мм)  $\pm 20$  мкм. Устройство введено в опытно-промышленную эксплуатацию на НМЗ «Искра» (Новосибирск). Его применение, благодаря более точному контролю, позволило существенно улучшить качество выпускаемой предприятием продукции.

3. Высокопроизводительное устройство бесконтактного контроля геометрических параметров длинномерных изделий (до 4 м) типа ТВЭЛ (В-1000) разработано с использованием оригинальных аппаратных и программных алгоритмов обработки измерительной информации (рис. 3). Быстродействие устройства 100 Гц, погрешности измерения диаметров (до 10 мм)  $\pm 10$  мкм, отклонений от прямолинейности (в диапазоне 1 мм)  $\pm 20$  мкм, длины  $\pm 100$  мкм. Устройство передано АО НЗХК для внедрения в опытно-промышленную эксплуатацию.

4. Оптико-электронная измерительная система «Блик» предназначена для высокопроизводительного интегрального размерного контроля втулочных изделий (рис. 4). Система позволяет бесконтактным способом, не повреждая поверхности контролируемых деталей, измерять внешние и внутренние диаметры, высоту, непрямолинейность образующей особо важных изделий для атомной энергетики (втулки, цилиндры и т. д.) [9]. Система в 1996 году успешно прошла полный цикл производственных испытаний и принята в

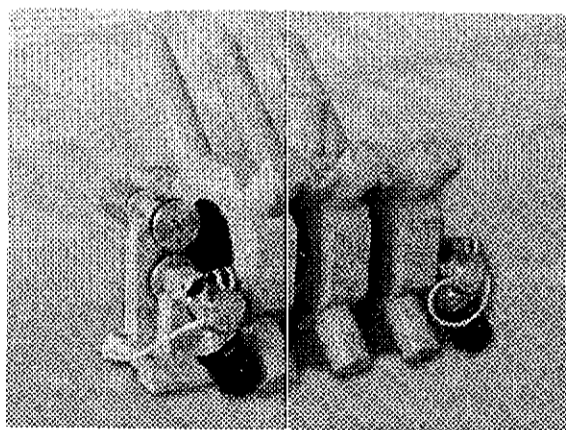


Рис. 3

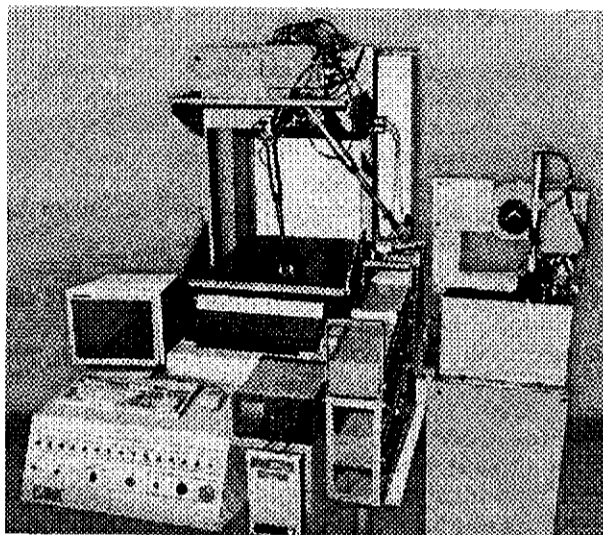


Рис. 4

опытную эксплуатацию в составе автоматической линии контроля втулочных изделий АО НЗХК.

На базе лазерных шупов в 1996 году впервые в отечественной практике разработано и создано бесконтактное оптико-электронное устройство контроля радиальных и торцевых биений колес автомобилей. Верхний предел контролируемых биений до 5 мм, погрешность измерения не более 50 мкм. Устройство передано АО «АвтоВАЗ» для использования в составе автоматической линии производства колес (производительность до 1000 шт./ч) взамен существующего контактного устройства контроля, что позволит значительно повысить точность измерений и надежность линии.

В настоящее время выполняются два проекта по оптическому размерному контролю (в интересах предприятий Минатома РФ). Первый из них предусматривает разработку бесконтактного метода и системы определения геометрических параметров трехмерных объектов сложной конфигурации на основе их структурного (многоточечного) освещения с последующей регистрацией волновых полей ПЗС-камерой. Целью второго проекта является разработка методики измерения геометрических параметров внешних резьб и создание на ее основе системы контроля таких изделий.

**Лазерные технологии.** Данное научно-техническое направление представлено в КТИ НИИ работами по созданию лазерных фотопостроителей (ЛФП) и технологий субмикронного разрешения, генераторов изображений микронного разрешения, а также технологических комплексов по лазерной резке и маркировке.

*Лазерные фотопостроители и технологии субмикронного разрешения.* Проблема изготовления высокоточных круговых шкал и кодовых дисков, форматирования мастер-дисков оптической памяти и особенно синтеза элементов дифракционной оптики на протяжении многих лет остается актуальной. В последнее время для этих целей стали использовать ЛФП — специальные генераторы изображений, работающие (под управлением компьютера) в полярной системе координат и реализующие принцип растрового сканирования. Работы в этом направлении интенсивно начали развиваться с середины 80-х годов в различных организациях, в том числе в ИАиЭ СО АН СССР. До 1991 года СКБ НИИ самостоятельных работ в этой области не вело. Его участие ограничивалось разработкой и выпуском отдельных узлов или модулей для электронных систем управления ЛФП, среди которых значительным достижением явилось создание в 1990 году интерференционного преобразова-



теля перемещений с разрешением 10 нм (на базе интерферометра с внутренней фазовой модуляцией).

В процессе выполнения этих работ стало ясно, что для достижения современного (субнанометрового) уровня управления исполнительными элементами подобных систем необходимы новые идеи. Таковой стала идея прямого восстановления фазы квадратурных сигналов непосредственно из частей этих сигналов [10]. Она реализована в новой конструкции коммерческой модели лазерного фотоплоттера CLWS-300, разработанного в КТИ НП в период с 1991 по 1994 год.

Детальные исследования характеристик системы линейных перемещений фотоплоттера показали, что в целом конструкция ЛФП гарантирует необходимые точностные показатели [11], при этом новая электронная система управления движением портала обеспечивает разрешающую способность не хуже 1 нм. Она позволяет перемещать портал сверхмалыми шагами (от единиц нанометров) и реализовать движение с малыми или сверхмалыми постоянными скоростями (от нанометров в секунду).

В целом достигнуты следующие технические характеристики ЛФП: диаметр рабочего поля 300 мм, пространственное разрешение 1200 лин./мм, угловая разрешающая способность 0,25 угл. с, скорость вращения шпинделя от 3 до 12 об./с.

Изготовленные на ЛФП изделия характеризуются высокой точностью формирования топологии. Так, накопленная погрешность нанесения штрихов на теодолитном лимбе, изготовленном для Уральского оптико-механического завода, не превысила  $\pm 1,2$  угл. с, а погрешность диаметров —  $\pm 0,6$  угл. с.

В 1995–1996 гг. КТИ НП совместно с ИАиЭ были поставлены три лазерных фотоплоттера CLWS-300 в Италию (Турин), Германию (Штутгартский университет и Берлинский институт оптики).

Среди проектов, выполняемых в рамках данного научно-технического направления, выделим два. Первый ориентирован на создание высокопроизводительного ЛФП повышенной надежности. Повышение производительности (в 5 раз и более) достигается в этой разработке за счет многоканальной записи информации.

Второй проект предполагает выполнение исследований по созданию новых технологий и оборудования для получения широкоапертурных (диаметром до 200–280 мм) фокусирующих оптических элементов с высокой дифракционной эффективностью (до 95–98 %). Создание таких дифракционных оптических элементов (ДОЭ) в значительной степени определяется прогрессом в технологии формирования зон Френеля с непрерывным или многоуровневым профилем, обеспечивающим, как известно, высокую концентрацию падающей световой волны в нужном порядке дифракции. Следует отметить, что такие проблемы решены при изготовлении элементов с малыми размерами (микрооптика). Трудности резко возрастают при изготовлении многоуровневых ДОЭ размерами 50–80 мм (хотя и в этих случаях еще удастся применять технологическое оборудование, созданное для микроэлектронной промышленности). При переходе к размерам ДОЭ порядка 150–250 мм подобрать соответствующее оборудование уже не представляется возможным. Более того, даже нанесение на подложку указанного диаметра пленки фоторезиста заданной толщины становится трудновыполнимой задачей.

В отличие от современных технологий микролитографии, для которых характерно преимущественное использование фоторезистов (в качестве основного фоточувствительного материала), данный проект ориентирован на технологию термохимической записи скрытых изображений в пленках хрома, хорошо зарекомендовавшую себя при записи бинарных структур. Для выбора данной технологии существенно, что процедура нанесения металлических пленок на большие поверхности освоена достаточно хорошо. Поэтому одна из основных целей проекта, прежде всего, заключалась в доказательстве возможности переноса термохимической технологии на процесс записи объемных структур в пленках хрома. Выполненные экспериментальные исследования на примере синтеза четырехуровневой структуры в пленках хрома с последу-

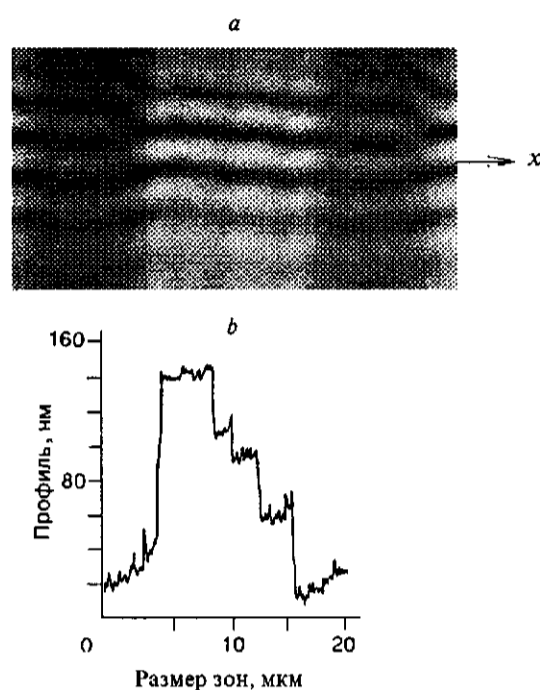


Рис. 5

Ющим проявлением их в селективном травителе подтверждают указанную выше возможность. В качестве примера на рис. 5, а представлено изображение четырехуровневой структуры с периодом зон 20 мкм, полученное с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4. Из анализа профилограмм синтезированных структур, полученных с помощью микроскопа атомных сил фирмы "Zeiss", следует, что предложенная в КТИ НП технология термохимической записи объемных структур в пленках хрома позволяет синтезировать элементы с пространственным разрешением до десятков нанометров в вертикальном направлении и до 0,3 мкм — в боковом (рис. 5, б).

Следует отметить, что для освоения в полном объеме технологии прямого синтеза высокоэффективных широкоапертурных ДОЭ необходимо выполнить комплекс исследований при разработке устройств микроперемещений подложек ДОЭ с нанометровым контролем их положения, адаптивного управления прецизионными исполнительными элементами, контроля профиля поверхности с нанометровым разрешением, прецизионного травления микроструктур в широком диапазоне рабочих полей. Успешное решение этой задачи, несомненно, будет способствовать научно-техническому прогрессу в области лазерных технологий субмикронного разрешения.

*Генераторы изображений микронного разрешения.* Лазерные технологии микронного разрешения развивались в СКБ НП в основном в рамках создания генераторов изображений барабанного типа (РОМБ-СО<sub>2</sub>) и лазерных фотопостроителей плоского поля. Эти работы начались в СКБ НП в 1973 году практически одновременно с работами ИАиЭ СО АН СССР. Как самостоятельное направление в СКБ НП оно оформилось в начале 80-х годов. Позднее было создано около десяти образцов лазерных генераторов изображения РОМБ-СО<sub>2</sub> с рабочим полем 600 × 600 мм при элементе изображения 25 мкм. Особое внимание в этих разработках уделялось вопросам технологичности, удобству работы пользователя, серийнопригодности при высокой точности механических узлов и современном дизайне. Работы этого направления осуществлялись совместно с ИАиЭ. В КТИ НП установка РОМБ-СО<sub>2</sub> используется для изготовления высокоточных фотошаблонов больших печатных плат. Широкое

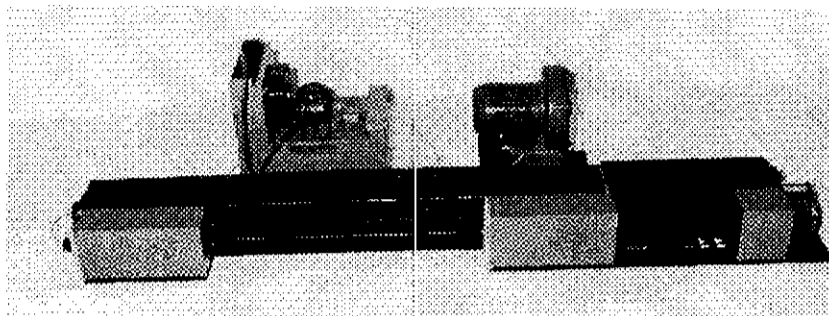


Рис. 6

применение генераторы подобного типа нашли при создании малых флексографических форм (печатей, штампов и т. д.). Ввиду возросшего спроса на генераторы изображений малого формата в 1995 году создана специализированная лазерно-гравировальная установка «Микрофлекс» (рис. 6) с рабочим полем  $235 \times 55$  мм. Она выгодно отличается от предыдущей модели малыми габаритами, простотой конструкции и низкой себестоимостью.

Среди перспективных направлений в области лазерных технологий микронного разрешения следует отметить управляемый синтез 3D-структур, прикладную художественную обработку различных материалов, что, в свою очередь, требует создания высокоскоростных прецизионных генераторов изображения плоского поля.

*Технологические системы для резки и маркировки.* Разрабатываемые в лаборатории лазерных промышленных технологий комплексы для резки листовых материалов основаны на использовании в качестве оптических квантовых генераторов наиболее перспективных для этих целей твердотельных Nd:YAG-лазеров, что соответствует мировой тенденции. Накоплен большой опыт создания таких комплексов, которые разработаны и внедрены в ПО «Электроагрегат», ПО «Сибсельмаш» (Новосибирск) и ПО «Сельмаш» (Назарово, Красноярского края). Создана установка «Гранат» для резки стальных листов толщиной до 3 мм в условиях промышленного производства (прототипом этого комплекса является установка «Севан», разработанная НИИ «Автогенмаш», Москва).

В настоящее время заканчивается разработка автоматизированного лазерного комплекса с координатным полем  $2000 \times 2000$  мм и точностью воспроизведения заданного контура 0,2 мм на базе твердотельного лазера с выходной мощностью 500 Вт и угловой расходимостью излучения 10 мрад. Комплекс позволит вести контурный раскрой стального листа толщиной до 10 мм. В рамках этого проекта ведутся теоретические и экспериментальные исследования особенностей взаимодействия лазерного излучения с веществом с целью создания физико-математической модели процесса и последующей оптимизации на ее основе технологических режимов.

Деятельность Института в области лазерной маркировки сосредоточена на решении актуальной научно-технической задачи, связанной с нанесением, считыванием и распознаванием кодовой информации применительно к важным изделиям отечественной атомной промышленности, что позволит повысить надежность работы атомных электростанций, организовать более строгий контроль и учет ядерного топлива. Указанные выше операции должны выполняться на различных технологических этапах изготовления деталей ядерных энергетических установок, в процессе их эксплуатации, а также на этапе послереакторных исследований. При этом вероятность ошибки на этапах изготовления деталей установок и последующей их эксплуатации при считывании информации не должна превышать  $10^{-6}$ . Проблема считывания и распознавания информации осложняется тем обстоятельством, что в процессе производства и эксплуатации поверхность изделий подвергается многократным модификациям (травление, анодирование, лакировка), приводящим к

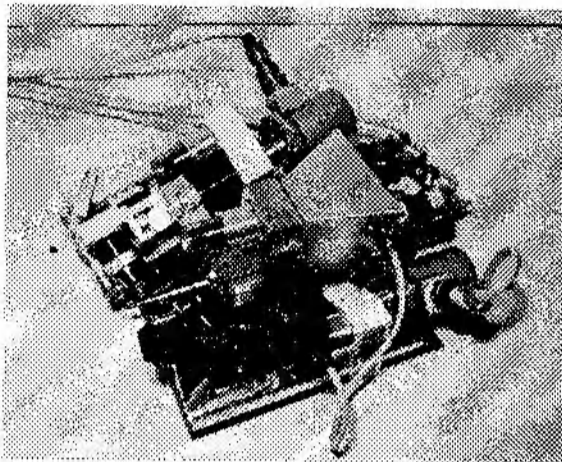


Рис. 7

изменению состояния кодовой поверхности и появлению поверхностных помех. Как показывают эксперименты, применение для считывания традиционного метода на основе амплитудной модуляции светового пучка дает отрицательный результат, что требует новых подходов к решению данной задачи.

В рамках выполнения проекта по лазерной маркировке разработаны специализированная штриховая система кодирования и оригинальный способ помехоустойчивой лазерной записи и оптико-электронного считывания кодовой информации. Запись производится двумя независимыми информационными каналами (несущими одну и ту же информацию), которые разнесены в пространстве объекта по глубине кодового микрорельефа. Разработана технология маркирования штрихового и символического кодов, обеспечивающая формирование кодового микрорельефа требуемого качества. Для считывания информации используется метод светового сечения. Оба информационных канала системой формирования изображения проецируются отдельно на поверхность фотоприемного устройства. Полученная информация обрабатывается и распознается микропроцессорной системой. Проведенные эксперименты свидетельствуют, что предложенный способ считывания кодовой информации обеспечивает высокую степень достоверности считывания и распознавания кода. Вероятность ошибки составляет  $10^{-6}$ , тогда как в случае использования традиционных амплитудных методов она равна  $10^{-4}$ . По результатам исследовательских работ созданы экспериментальные образцы лазерного маркирующего комплекса (рис. 7), которые в настоящее время готовятся к испытаниям в АО НЗХК.

Созданные лазерные комплексы представляют интерес и для других предприятий атомной промышленности. В настоящее время ведется перспективная разработка портативного считывающего устройства, которое планируется внедрить в отрасли.

**Заключение.** За шесть лет существования КТИ НП СО РАН удалось развить такие перспективные научно-технические направления, как оптические и лазерные технологии; сохранить и придать новый импульс работам в области проблемно ориентированных компьютерных систем; сконцентрировать усилия коллектива Института на решении актуальных задач в интересах ряда ведущих отраслей страны. Наличие в настоящее время в Институте высококвалифицированного научно-инженерного потенциала, экспериментальной базы и действующего опытного производства позволяет в сжатые сроки выполнять НИОКР по созданию конкурентоспособных образцов принципиально новой техники для поставки на экспорт и оснащения технологических линий отечественного производства. Так, в течение последних лет в КТИ НП СО РАН созданы:

— гамма оптико-электронных систем размерного контроля;

- рентгеновские томографические системы неразрушающего контроля;
- коммерческая модель лазерного фотоплоттера субмикронного разрешения (совместно с ИАиЭ СО РАН) (поставляется в промышленно развитые страны);
- лазерные генераторы изображений микронного разрешения;
- цифровой инфракрасный спектрофотометр для определения концентрации нефтепродуктов в сточных и природных водах;
- лазерно-оптический диагностический прибор;
- системы лазерной маркировки и считывания технологической информации применительно к изделиям атомной энергетики.

Безусловно, будущее Института во многом зависит от стабильности финансирования НИОКР со стороны отечественных заказчиков, а также от сохранения режима наибольшего благоприятствования для бюджетных организаций Российской академии наук.

Автор выражает благодарность зав. лабораторией к. т. н. А. К. Поташникову (лаборатория информационно-технологических систем), зав. лабораторией к. т. н. В. П. Кирьянову (лаборатория лазерных прецизионных систем), зав. лабораторией д. ф.-м. н. А. М. Кондратенко (лаборатория лазерных промышленных технологий) и н. с. С. В. Плотникову (лаборатория технического зрения) за помощь и полезные дискуссии при подготовке данной статьи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев В. В., Громилини Г. И., Косых В. П., Обидин Ю. В., Поташников А. К. Томограф для контроля сварных соединений ТВЭЛ // 14 Российская науч.-техн. конф. «Неразрушающий контроль и диагностика»: Тез. докл. М.: РОНКГД, 1996.
2. Жуков Ю. А., Карлов Ю. К., Косых В. П., Поташников А. К., Обидин Ю. В., Чащин С. Б. Компьютерная томография в задачах контроля сварных соединений ТВЭЛ // Автометрия. 1997. № 4. С. 43.
3. Chugui Yu. V., Krivenkov B. E. Fraunhofer diffraction by volumetric bodies of constant thickness // JOSA. 1989. 6, N 5. P. 617.
4. Chugui Yu. V. Constructive theory of formation and filtering the optical images and Fraunhofer diffraction patterns of 3D opaque objects of constant thickness in coherent light // Proc. SPIE. 1996. 2655. P. 287.
5. Чугуй Ю. В. Особенности формирования и оконтуривания изображений объемных тел в когерентном свете // Автометрия. 1991. № 4. С. 103.
6. Feutlinske K., Gast Th. Berührunglose optisch-elektrische Prüfung von Lagen und Dimensionen // Qualität und Zuverlässigkeit. 1985. 30. S. 117.
7. Плотников С. В. Сравнение методов обработки сигналов в триангуляционных измерительных системах // Автометрия. 1995. № 6. С. 58.
8. Богомолов Е. Н., Василенко Н. В., Кривенков Б. Е., Чугуй Ю. В., Шульженко Л. М., Юношев В. П., Ярославцев И. В. Фотодиодный оптико-электронный измеритель размеров «Сенсор» // Автометрия. 1989. № 5. С. 83.
9. Витюцкий О. И., Вертопрахов В. В., Ладыгин В. И., Пастушенко А. И., Плотников С. В., Чугуй Ю. В., Юношев С. П. Оптико-электронная система бесконтактного контроля геометрических параметров полых цилиндров // Автометрия. 1995. № 6. С. 69.
10. Кирьянов В. П. Метод прямого восстановления фазы квадратурных сигналов и его использование в системах позиционирования с нанометровым разрешением // Автометрия. 1997. № 3. С. 103.
11. Кирьянов В. П., Анциферов А. П., Ведерников В. М., Волков Е. Г., Ерышев А. И., Кирьянов А. В., Муравьев А. И. Анализ и экспериментальное исследование системы радиальных перемещений лазерного фотоплоттера субмикронного разрешения // Автометрия. 1994. № 3. С. 31.

*Поступила в редакцию 15 апреля 1997 г.*