

4. Справочник физических констант горных пород / Под ред. Г. Д. Афанасьева, Б. П. Беликова, М. П. Воларовича – М.: Мир, 1969. – 544 с.
5. Мочалов А. А., Гайша А. А., Евфимко К. Д. Динамика деформации структурной единицы твердого тела от внешнего воздействия // Журнал нано- та електронної фізики. – 2009. – Т1, № 1 – С. 70-79
6. Мочалов А. А., Евфимко К. Д. Исследование влияния высокого давления на макроскопические параметры вещества // Вісник СумДУ. – 2008. – № 1 – С. 156-160.

МОЧАЛОВО.О., ЕВФИМКОК.Д., ГАЙШАО.О. Дослідження залежності параметрів потенціалу Морзе від температури та тиску для металів.

Досліджено вплив високого тиску на фізичні властивості металу, запропонована методика розрахунку коефіцієнту при експоненті потенціалу Морзе, вивчена залежність даного коефіцієнту від зовнішнього тиску з урахуванням фізичних властивостей металу при його всебічному адіабатичному стисненні.

Ключові слова: коефіцієнт при експоненті потенціалу Морзе, деформація, адіабатичне зтиснення, математична модель.

MOCHALOV A., EVFIMKO K., GAISHA A. The new approach in matter parameters research

The influence of the high-pressure on metal physical properties is investigated. The new method of Morse potential exponent coefficient calculation is proposed. The Morse potential exponent coefficient dependence on the pressure for metals in case of adiabatic compression is studied/

Keywords: morse potential exponent coefficient, deformation, adiabatic compression, mathematical model.

УДК 681.518.54

Н. Н. Крупа

Институт магнетизма НАН и МОН Украины, Киев

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКОГО, МАГНИТНОГО И ВИХРЕТОКОВОГО МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПРОВОДЯЩЕГО И НЕПРОВОДЯЩЕГО МАТЕРИАЛОВ

Изложены результаты разработок магнитного, вихретокового и оптического интерференционного методов контроля поверхностного слоя деталей, полученные в Институте магнетизма НАН и МОН Украины.

Ключевые слова: поверхностный слой, метод контроля, магнитный, вихретоковый, оптический, интерференционный

Введение

Современные материалы, используемые в судостроении и машиностроении, должны обеспечивать необходимый ресурс и надежность работы конструкций и исполнительных механизмов. Известно, что характеристики поверхностного слоя материала являются важными при определении характеристик сопротивления процессу ползучести, порога зарождения микротрещин и разрушения, а также развития субкритических разрушений. Одними из основных характеристик, которые определяют показатели надежности работы материалов, являются показатели усталостных и

коррозионных характеристик, а также скорость распространения трещин в материале. Коррозионные и усталостные показатели сильно зависят от состояния поверхности используемых деталей и конструкций, поэтому проблема контроля качества обработки и изменения в процессе эксплуатации состояния поверхности деталей и конструкций является важной и актуальной.

Для неразрушающего контроля состояния поверхности и приповерхностного слоя деталей используют ультразвуковые, вихретоковые, магнитные, оптические, радиационные, радиоволновые, тепловые и электрические методы. Ультразвуко-

вой контроль базируется на регистрации отраженных ультразвуковых колебаний от дефектных участков исследуемого материала. Преимуществами ультразвуковой дефектоскопии являются большая проникающая способность и высокая чувствительность, что позволяет регистрировать глубокие внутренние дефекты. К недостаткам метода относятся необходимость хорошего контакта в месте контроля, невысокая точность и разрешающая способность $\Delta\lambda \sim 1\text{ мм}$.

Вихретоковые методы контроля применяют для электропроводных материалов. При воздействии переменного электромагнитного поля, создаваемого генераторной катушкой, в металле контролируемой детали возникают вихревые токи, электромагнитное поле которых фиксируется измерительной катушкой. Дефекты в контролируемом изделии увеличивают электрическое сопротивление поверхностного слоя металла, что приводит к ослаблению вихревых токов. Метод вихревых токов можно использовать для выявления поверхностных и приповерхностных дефектов на глубине проникновения порядка длины волны электрического поля, что позволяет контролировать толщину порядка 1 мм при максимальной разрешающей способности $\Delta\lambda \sim 0,1\text{ мм}$.

Магнитные методы основаны на регистрации искажений в распределении магнитного поля, которые создаются дефектами в исследуемых ферромагнитных материалах. Контроль производится в постоянном или переменном магнитном поле. Детали намагничивают постоянным, импульсным униполярным, переменным или комбинированным магнитными полями. Магнитное поле регистрируют магнитопорошковым способом или различными (холловские, феррозондовые, индукционные и магниторезистивные) магнитными датчиками. Разрешающая способность магнитопорошкового способа выше и может достигать для поверхностных дефектов 0,001 мм. При использовании магнитных датчиков она меньше и зависит от разрешающей его способности. С увеличением глубины залегания дефекта разрешающая способность магнитных методов, как и вихретоковых методов, снижается.

В радиационных методах контроля измеряется разность в поглощении и отражении ионизирующего излучения (рентгеновское, нейтронное, β -излучение и γ -излучение) дефектов и основного материала. Преимуществами этих методов являются высокая чувствительность и проникающая возможность, бесконтактный контроль движущегося изделия. Основные недостатки радиационных методов – необходимость специальных мер безопасности, а также малая угловая апертура направления измерения.

Тепловой метод основан на регистрации распределения температурных полей исследуемого изделия. Измеряется температурное поле работающего или специально нагретого изделия. Температуру или тепловые потоки измеряют контактными или бесконтактными способами. Этот метод

применим к любым материалам.

Оптические методы основаны на регистрации прошедшего, отраженного, рассеянного и индусированного излучения, возникающего в контролируемом объекте под действием внешнего воздействия. Эти методы применяют для обнаружения поверхностных и внутренних дефектов в деталях и изделиях, изготовленных из различных материалов. Информативными параметрами этих методов являются амплитуда, фаза, степень поляризации, частота или частотный спектр, время прохождения света через объект, геометрия преломления или отражения излучения. Оптические методы широко применяют для контроля качества обработки поверхности деталей. Разрешающая способность визуальных оптических методов порядка длины волны $\Delta\lambda \sim 1\text{ мкм}$. В последнее время развиваются оптические интерференционные методы, которые позволяют поднять разрешающую способность до предела $\Delta\lambda \sim 1\text{ нм}$.

В радиоволновом методе вместо оптического излучения используются волны сверхвысокочастотного диапазона длиной 1-100 мм для контроля изделий из материалов с малым коэффициентом поглощения. Регистрируют прошедшее, отраженное, рассеянное излучения или распределение потенциала резонансно возбуждаемого электрического поля. Разрешающая способность этого метода также порядка длины волны излучения.

В электрическом методе измеряется распределение электрического потенциала или картины эмиссии ионов с поверхности изделия при прохождении электрического тока через контролируемое изделие.

С точки зрения технологичности, надежности и автоматизации контроля лучшими методами контроля качества обработки поверхности и дефектности приповерхностного слоя являются методы вихревого тока, магнитные и оптические методы.

В настоящей работе сообщается о результатах, полученных в Институте магнетизма НАН и МОН Украины, при разработке магнитного, вихретокового и оптического интерференционного методов контроля поверхностного слоя деталей из проводящего и непроводящего материалов.

Система магнитного и вихретокового контроля дефектов в приповерхностном слое

Для измерения пространственной неоднородности электромагнитного поля, регистрируемого вихретоковым и магнитным методом контроля дефектов в приповерхностном слое, в Институте магнетизма НАН И МОН Украины была разработана (Черепов С. В. и Дереча Д. А.) стационарная специальная автоматизированная система, блок-схема которой представлена на рис. 1.

Данная система состоит из таких основных блоков: измерительного датчика, в качестве которого использовали стандартные датчики Холла типа LPH1002-B, или разработанных нами миниатюрных вихретоковых, магнитомодуляционных и магниторезистивных датчиков; блока генерации и

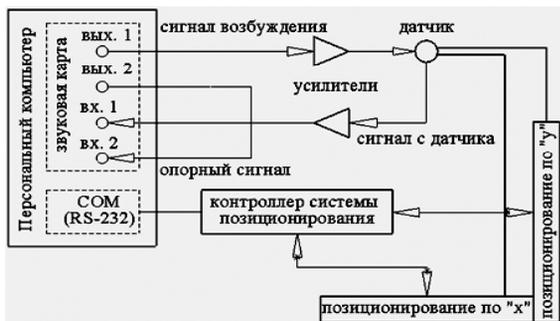


Рис. 1. Блок-схема системы контроля

выдачи сигнала на датчик; усилителя регистрируемого сигнала; блока записи и математической обработки сигнала; двухкоординатного позиционера измерительных датчиков; блока управления позиционером. Взаимосвязь между блоками системы показана на рис. 1.

В качестве блока генерации и приемки сигнала использовалась 24-битовая звуковая карта персонального компьютера, которая является хорошим цифро-аналоговым и аналогово-цифровым преобразователем. Она имеет широкий динамический диапазон, обеспечивает частоту дискретизации сигнала до 192 кГц, позволяет генерировать стабильные сигналы с частотой до 40 кГц и проводить их анализ с частотой до 20 кГц. При необходимости повышения частоты сигнала до 100 кГц, подаваемого на магнитомодуляционные датчики, использовался специальный малогабаритный генератор.

Блок позиционера на двух шаговых двигателях управлялся персональным компьютером (ПК) и обеспечивал автоматическое сканирование исследуемого объекта по двум координатам в области 200x200 мм с точностью до 0,05 мм.

Сигнал с датчика записывался в буфер операционной системы ПК, затем обрабатывался. Математическая обработка сигнала осуществлялась следующим образом: после «сшивки» данных с буферов методом Фурье фильтрации (алгоритм БФП) удаляли постоянную составляющую в уровне сигнала, записанного для данного датчика 50 Гц составляющей и кратных ей составляющих. Потом полосовым фильтром проводилось программное сужение диапазона частот сигнала с датчика, дальше сигнал детектировался по амплитуде и фазе, и данные записывались или выводились на экран.

Алгоритм работы системы представлен на рис. 2.

Эта система может работать с разными типами датчиков. Нами также проведена разработка миниатюрных высокоразрешающих вихретоковых датчиков и магнитных датчиков модуляционного и магниторезистивного типов. Вихретоковый датчик в рамках нашей системы контроля обеспечивал разрешающую способность до 50 мкм при чувствительности не ниже 10^{-4} Гс. На рис. 3 показаны результаты сканирования нашей системой контроля деталей с таким вихретоковым датчиком.



Рис. 2. Структурная схема программы управления и обработки сигнала

Кроме такой стационарной системы контроля на основе миникомпьютера был разработан переносной аппарат для измерения магнитных полей и дефектов в приповерхностном слое ферромагнитных материалов [1]. Такой аппарат позволяет измерять спектр, величину и направление магнитного поля в полосе частот 0-40 кГц, а также обнаруживать дефекты в приповерхностном слое ферромагнетика без применения внешнего подмагничивающего магнитного поля только за счет остаточного магнитного поля или магнитного поля земли. Это обеспечивается высокой чувствительностью и высокой анизотропией наших миниатюрных датчиков. Датчики магнитного поля работали на магнитомодуляционном и магниторезистивном принципах измерения поля.

Чувствительным элементом магнитомодуляционных датчиков является тонкая полоска из аморфной магнитной ленты на основе железобальтовых сплавов толщиной 10-20 мкм или тонкие магнитные пермаллоевые пленки (0,3-0,6 мкм) на подложке толщиной 1 мм. Длина такой полоски составляет 10-15 мм при ширине 1-2 мм. Особенность данного ферромагнитного сердечника в том, что он имеет очень малую коэрцитивную силу (около 1 А/м) и одноосную плоскостную анизотропию с малой дисперсией полтора-два градуса направления оси легкого намагничивания. Последнее достигается за счет специального режима изготовления и обработки.

Полоска вырезается таким образом, что ее длинная сторона совпадает с осью легкого намагничивания. На эту полоску под углом 45° к оси легкого намагничивания вдоль всей длины наматывается (напыляется через маску) однослойная возбуждающая катушка, на которую под углом 90° к оси легкого намагничивания наматывается сигнальная катушка. Число витков на единицу длины у

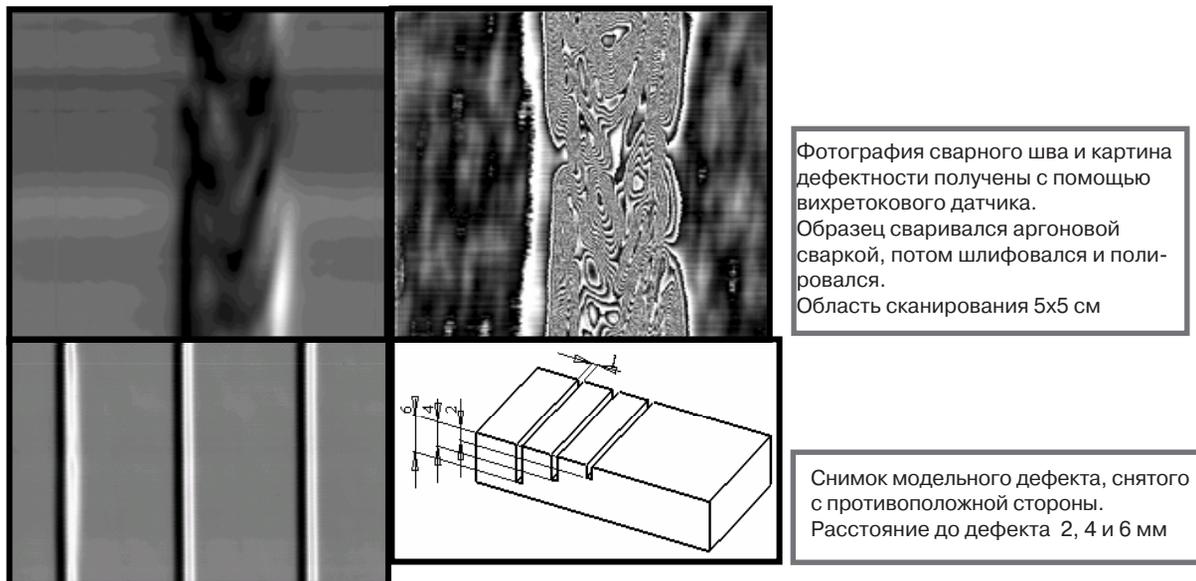


Рис. 3. Результаты сканирования деталей системой с вихретоковым датчиком

Фотография сварного шва и картина дефектности получены с помощью вихретокового датчика. Образец сваривался аргоновой сваркой, потом шлифовался и полировался. Область сканирования 5x5 см

Снимок модельного дефекта, снятого с противоположной стороны. Расстояние до дефекта 2, 4 и 6 мм

сигнальной катушки n_s в 10 раз больше числа витков на единицу длины возбуждающей катушки n_i .

На возбуждающую катушку подается стабилизированное по частоте и амплитуде напряжение

$$U = U_0 \sin \omega_0 t, \quad (1)$$

которое генерирует магнитное поле, направленное под углом 45° к легкой оси намагничивания ферромагнитной полоски. Это поле создает измерительный сигнал на сигнальной катушке

$$U_{s0} = k_{s0} \frac{n_s}{n_i} \mu U_0 \sin(\omega_0 t + \phi_0), \quad (2)$$

где μ – магнитная проницаемость материала ферромагнитного сердечника; k_{s0} – коэффициент пропорциональности.

Если на ферромагнитный сердечник действует внешнее магнитное поле $H_s = H_0 \sin \omega_s t$, то оно приводит к изменению измерительного сигнала

Проводя спектральную фильтрацию измерительного сигнала из данных, вычисленных для каждой измеренной частоты, можно найти величину магнитного поля. В данной работе использовали магнитомодуляционные датчики, которые работали на таких возбуждающих частотах ω_0 , и получили для них следующую чувствительность γ : датчик с аморфной лентой железокобальтовых сплавов

$$U_s = k_{s0} \frac{n_s}{n_i} U_0 \sin(\omega_0 t + \phi_0) + k_s n_s \mu H_s \sin(\omega_s t + \phi_s). \quad (3)$$

- $\omega_0 = 10$ кГц, $\gamma = 10^{-8}$ Т; датчик с тонкими пермаллоевыми пленками FeNi - $\omega_0 = 100$ кГц, $\gamma = 10^{-9}$ Т.

Кроме таких магнитомодуляционных датчиков разработаны также миниатюрные магниторезистивные датчики [2], которые работают на основе магниторезистивного эффекта, возникающие в тонких однородных пленках пермаллоя или в гранулированных магнитных пленках типа CoAg,

CoCu или CoAl_2O_3 . Принцип работы такого датчика показан на рис. 4.

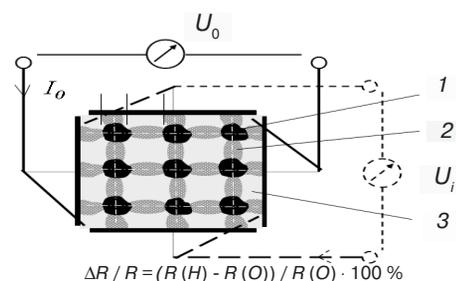


Рис. 4. Схема магниторезистивного датчика на основе гранулированной магнитной пленки: 1 – магнитные гранулы, 2, 3 – немагнитная матрица

Конструктивно магниторезистивный датчик выполнен в виде квадратной пластинки (подложка с пленкой), по диагонали к углам пленки подведены по две пары контактов. На одну пару контактов подается возбуждающее стабилизированное переменное напряжение $U = U_0 \sin \omega_0 t$, а с другой пары снимается сигнал, величина которого пропорциональна величине магнитного поля, действующего по направлению перпендикулярному к диагонали возбуждающего сигнала. Используемые в магниторезистивном датчике пленки также имеют малую коэрцитивную силу 1-10 А/м и одноосную плоскостную анизотропию с малой дисперсией $1,5-2,0^\circ$ направления оси легкого намагничивания, что также достигается за счет специального режима изготовления [3].

При условии, что $\Delta R = R(0)(1 - \alpha H)$ и $\alpha(H_{\parallel}) \ll \alpha(H_{\perp})$, где $\alpha(H_{\parallel})$ и $\alpha(H_{\perp})$ – коэффициенты изменения сопротивления материала пленки при действии магнитного поля вдоль и перпендикулярно к направлению тока

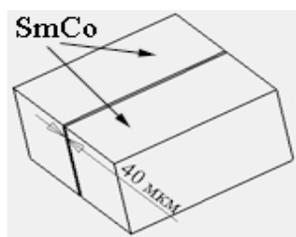
$$U_i = k \frac{4R_0 H (\alpha - 1)^2}{\alpha}, \quad (4)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

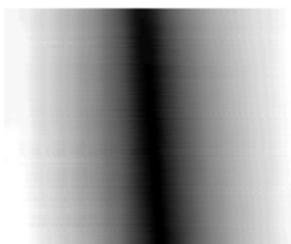
Магниторезистивные датчики работают в широком диапазоне частот от 0 до 1 МГц. Наши датчики при частоте возбуждения 1 МГц имели следующую чувствительность: с тонкими пермаллоевыми пленками FeNi $\gamma=10^{-8}$ Т; с гранулированными пленками CoAg $\gamma=10^{-7}$ Т.

На рис 5. показаны результаты сканирования нашей стационарной системы контроля с магниторезистивным датчиком системы с SmCo магнитов, склеенной полюсами навстречу друг другу с щелью 40 мкм с таким датчиком.

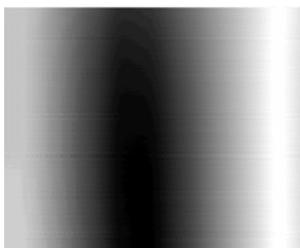
Таким образом, эти результаты показывают, что на основе нашей стационарной системы контроля с различного типа вихретоковых и магнитных датчиков можно проводить эффективный контроль дефектности приповерхностного слоя деталей как из магнитных, так и немагнитных проводящих материалов в процессе изготовления или эксплуатации на основе тестовых образцов. Переносная система контроля на основе миникомпьютера позволяет проводить оперативный эффективный контроль дефектности приповерхностного слоя деталей как из магнитных, так и немагнитных проводящих материалов непосредственно на рабочем месте во время работы механизмов, что говорит о широкой перспективе ее использования.



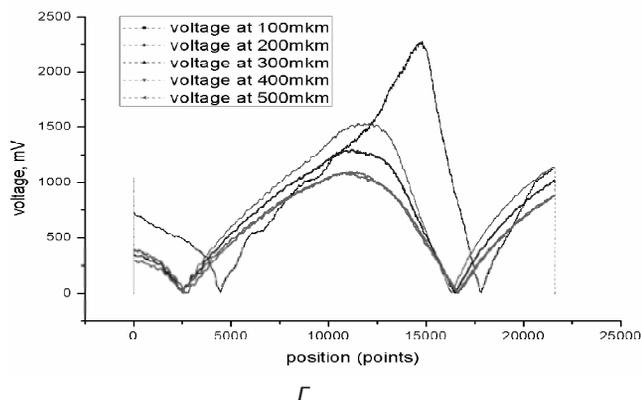
а



б



в



г

Рис. 5. Результаты измерения z-компоненты магнитного поля системы Sm-Co: а – схема SmCo магнитов; б – высота над системой 50 мкм; в – высота 1050 мкм; г – сечения напряженности поля в плоскости; напряженность поля; б – белый цвет – 0 Гс, максимум черного –1,7 кГс; в – белый – 0 Гс, максимум черного –1,3 кГс; область сканирования 4,5х5 мм

Оптические интерференционные системы контроля состояния поверхности изделий

Как уже отмечалось, оптические методы контроля наиболее широко применяются для контроля качества обработки поверхности деталей, хотя их можно эффективно использовать и при контроле состояния поверхности деталей в процессе эксплуатации. Качество обработки поверхности деталей можно характеризовать шероховатостью, которая зависит от технологии обработки и влияет на основные эксплуатационные характеристики, на коррозионную стойкость, отражательную и поглощающую способности деталей. Поэтому состояние поверхности не только контролируется известными методами, но и ведутся разработки новых методов и приборов оптического контроля состояния поверхности.

В Институте магнетизма также получены интересные результаты по разработке оптического интерференционного профилометра, который позволяет осуществлять контроль шероховатости поверхности на уровне 1 нм. При построении оптических интерференционных профилометров существуют два основных подхода: формирование массива последовательных интерференционных изображений поверхности образца, полученных при периодическом малом изменении разности хода в плече интерферометра, где установлен исследуемый образец; регистрация информации о разности фаз между двумя отраженными когерентными лазерными пучками от поверхности исследуемого образца, сфокусированными на две близко расположенные точки поверхности, и последовательное сканирование этих пучков. В обоих этих подходах проводится аппаратно-программная обработка информации компьютерными методами.

Разработан настольный сканирующий лазерный нанопрофилометр [4], структурная схема которого представлена на рис. 6.

Особенностью данного профилометра является сканирование поверхности с помощью электрооптического или акустооптического двухкоординатного дефлектора двумя сходящимися под очень малым углом (порядка 10 с) коллинеарными когерентными лазерными пучками, что позволяет контролировать любой тип поверхности с малой отражающей способностью. На рис. 7 представлены результаты измерений с помощью данного нанопрофилометра.

Полученные результаты показывают, что с помощью нашего нанопрофилометра можно проводить контроль поверхности деталей с точностью до 2 нм по глубине. Понятно, что область сканирования при такой точности будет небольшая (порядка 100 мкм), однако при снижении точности можно увеличить область сканирования в десятки раз. Кроме того, для измерения большой области поверхности нужно проводить последовательное измерение отдельных участков и сшивку полученных результатов.

Нужно отметить, что разработанный нами ме-

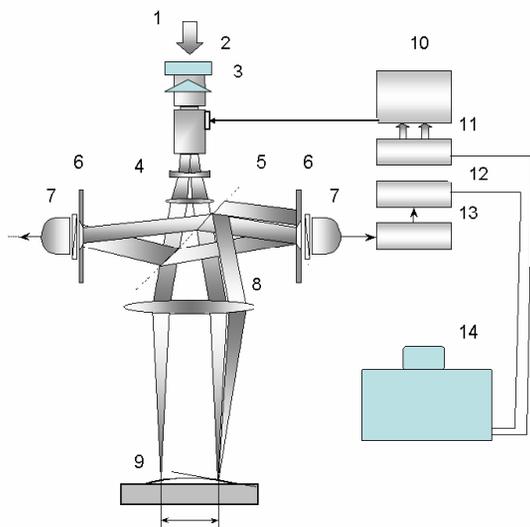


Рис. 6. Структурная схема сканирующего лазерного нано-профилометра: 1 – лазер с коллиматором; 2 – ослабитель излучения лазера; 3 – специальная бипризма Френеля; 4 – двухкоординатный дефлектор; 5 – светоделитель; 6 – дополнительный объектив; 7 – ПЗС матрица; 8 – микрообъектив; 9 – предметный столик; 10 – блок управления дефлектором; 11 – блок питания дефлектора; 12 – блок обработки сигналов с ПЗС матрицы; 13 – блок питания ПЗС матрицы; 14 – персональный компьютер

тод измерения позволяет исследовать поверхность деталей и объектов, размещенных на большом расстоянии от прибора, и не требует специальной виброустойчивой системы. Этот факт подчеркивает широкие возможности приборов, построенных на основе нашего технического решения.

В описанном выше лазерном нано-профилометре используется лазерное излучение видимого спектрального диапазона. Для практики оптического контроля дефектности приповерхностного слоя изделий очень интересным и перспективным является переход в терагерцовый диапазон

электромагнитного излучения, которое при длине волны от ста микрон и до нескольких миллиметров имеет сравнительно малый коэффициент поглощения для большинства материалов, что позволяет использовать его для диагностики и контроля в медицине, в охранных системах и системах контроля поверхностного слоя деталей и конструкций.

Для практического применения терагерцового излучения (ТГИ), прежде всего, нужны малогабаритные источники и приемники. Хорошо известны такие методы получения ТГИ, как выделение части излучения тепловых источников селективными спектральными фильтрами, коротковолновое радиоизлучение специальных электронных генераторов и лазерная генерация разностных частот в нелинейной среде. Однако источники ТГИ такого типа являются громоздкими и эффективность их работы невелика. В последнее время вышел ряд интересных работ, в которых предлагается получать ТГИ при лазерном возбуждении полупроводниковых структур с распределенной обратной связью [5] или квантовыми точками [6]. Но при этом возникают сложности, связанные с технологией получения таких специальных полупроводниковых структур и трудностью реализации лазерной генерации ТГИ из-за малого коэффициента усиления.

Проведены исследования нового механизма электромагнитного излучения в терагерцовом диапазоне [7] и предложен способ создания малогабаритного лазера, излучающего в терагерцовом диапазоне спектра [8]. Схема такого лазера представлена на рис. 8.

Особенность описанного терагерцового лазера в том, что генерация терагерцового излучения достигается только за счет того, что в тонких монокристаллических пластинках CdS при накачке источником ультрафиолетового излучения (ртут-

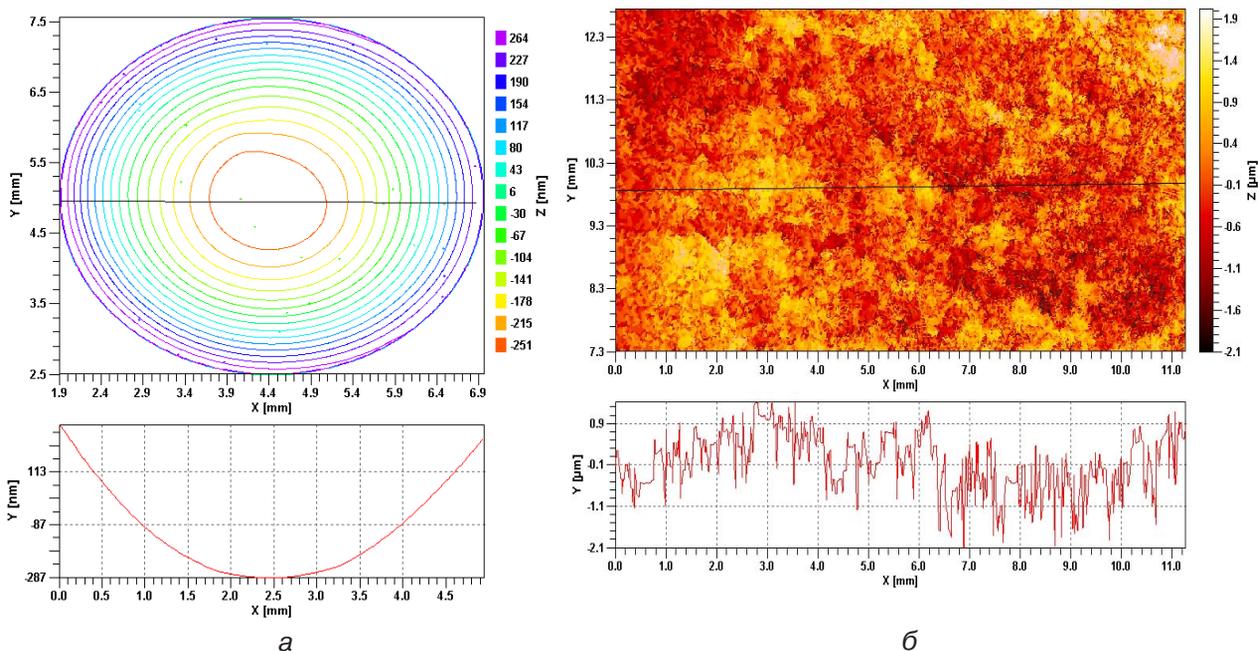


Рис. 7. Профиль эталонной стеклянной сферической (а) и шлифованной латунной поверхности (б)

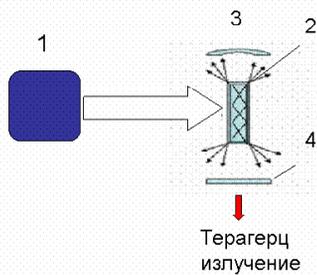


Рис. 8. Схема терагерцового лазера: 1 – источник накачки ультрафиолетовым излучением; 2 – монокристаллическая пластинка кристалла CdS; 3 – сферическое зеркало для терагерцового излучения; 4 – плоское полупрозрачное зеркало для терагерцового излучения



ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. UA 6951 Украина. С. Ф. Григорьев, В. А. Глива, М. М. Крупа и др. Заяв. 21.03.2005. – Оpubл. 16.05.2005. – Бюл. № 5.
2. Пат. UA 7151 Украина. М. М. Крупа, В. А. Черненко Заяв. 05.02.2003. – Оpubл. 15.12.2004. – Бюл. № 6.
3. Пат. UA 8239 Украина. Матвиенко А. И., Погорелый А. Н., Сандлер Л. М. и др. Заяв. 04.11.1993. – Оpubл. 29.03.1996. – Бюл. № 1.
4. Заявка на пат. № а 2007 14020 Украины. М. М. Крупа. Заяв. 20.06.2008. – Пол. реш. 07.04.2009.
5. Mizoguchi K., Mizumoto A., Nakayama M., et. el. //Journal of Applied Physics. – 2006. – V. 100, № 103227. – P. 1.
6. Jiang H., Weng M. Q., Wub M. W. / Journal of Applied Physics. 2006. – V. 100. – 063709. – P.1-3
7. Крупа Н. Н. / Изв. вузов. Радиофизика. – 2008. – Том XX, № 12. – 865 с.
8. Пат. № 86248. Украина. М. М. Крупа Заяв. 19.02.2007. – Оpubл. 10.04.2009.

КРУПА М. М. Деякі особливості оптичного, магнітного і вихрострумowego методу контролю поверхневого шару деталей з провідного і непровідного матеріалів.

Наведено результати розробок магнітного, вихрострумowego і оптичного інтерференційного методів контролю поверхневого шару деталей, які отримані в Інституті магнетизму НАН і МОН України.

Ключові слова: поверхневий шар, метод контролю, магнітний, вихретоковий, оптичний, інтерференційний.

KRUPA M. Some features of optical, magnetic and vortex-current method of control of superficial layer of details from conducting and non-conducting materials

The results of development by the Institute of magnetism of magnetic, vortex-current and optical interference method of control of superficial layer of details are expounded in this work.

Keywords: a superficial layer, method of control, is magnetic, vortex-current, optical, interference.