

УДК 53.082.55

А. Г. Верхогляд¹, М. А. Завьялова¹, Б. А. Князев^{2,3},
С. Н. Макаров¹, М. Ф. Ступак¹

¹ Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН
ул. Русская, 41, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: mzav@tdisie.nsc.ru

² Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия

³ Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: ba_knyazev@phys.nsu.ru

РАЗРАБОТКА КОНФОКАЛЬНОГО ДАТЧИКА 3D ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ДИФРАКЦИОННОГО ХРОМАТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ТЕРАГЕРЦОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ *

В статье представлено описание и возможности конфокального датчика 3D поверхности, созданного на основе дифракционного хроматического кодирования в сочетании с видеотехнологиями, для целей терагерцовой спектроскопии. Основным элементом датчика является оригинальный гибридный рефракционно-дифракционный объектив. Показана возможность использования в качестве спектроанализатора цветной видеокамеры.

Ключевые слова: спектроскопия нарушенного полного внутреннего отражения, терагерцовый диапазон, конфокальный датчик 3D поверхности, метод хроматического кодирования.

A. G. Verkhogliad, M. A. Zavyalova, B. A. Knyazev, S. N. Makarov, M. F. Stupak

DEVELOPMENT OF CONFOCAL 3D SURFACE SENSOR BASED ON THE DIFFRACTION-CHROMATIC CODING METHOD FOR THE PURPOSE OF SPECTROSCOPIC MEASUREMENTS

This article presents description and features of confocal 3D surface sensor which is based on the principle of diffraction-chromatic coding with subsequent RGB image processing for the purpose of terahertz spectroscopy applications. The main part of the sensor is a specially designed hybrid refractive-diffraction objective lens. RGB color image decomposition processing was done by regular color video camera.

Keywords: attenuated total reflection spectroscopy, terahertz region, confocal 3D surface sensor, chromatic coding method.

Введение

Терагерцовая фотоника является перспективным направлением физики терагерцового диапазона. Созданные в настоящее время источники мощного терагерцового излучения инициировали целый ряд междисциплинарных исследований для изуче-

ния их возможностей. Актуальной задачей является разработка новых научно-технических подходов к созданию приборов и методов исследования объектов, практически отсутствующих для данного диапазона. Одним из таких методов является изображающая спектроскопия нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) [1].

* Работа частично поддержана Интеграционным грантом СО РАН № 89.

Большая длина волны терагерцового излучения (30 – 300 мкм) ограничивает разрешающую способность квазиоптических методов, поэтому актуальной является задача преодоления волнового предела, которую можно решить путем объединения метода терагерцовой НПВО-спектроскопии с методом ближнепольной зондовой сканирующей микроскопии [2]. Комбинация этих двух методов даст возможность исследовать спектральные характеристики тонких слоев материалов, обладающих очень большим коэффициентом поглощения в терагерцовом диапазоне. Рассмотрим краткое описание этих методов.

В схеме изображающего НПВО-спектрометра эффект полного внутреннего отражения от границы раздела между НПВО-элементом (например, призмой из кремния) с высоким показателем преломления $n_0 = 3,4$ и образцом с меньшим показателем преломления n при угле падения больше критического $\theta_c = \arcsin(n/n_0)$ нарушается, если исследуемый образец поглощает терагерцовое излучение. Тогда на границе раздела возникает затухающая эванесцентная волна. Введение зонда в область локализации эванесцентной волны позволит реализовать метод ближнепольной зондовой сканирующей микроскопии. Сканирование поверхности объекта и детектирование результата взаимодействия объекта и зонда дает возможность исследовать оптические свойства образца в локальных областях, соответствующих размеру зонда (как правило, диаметр апертуры которого много меньше длины волны излучения). Тем самым можно преодолеть дифракционный предел с целью исследования субстанций и объектов как макроскопических размеров, так и микро, а возможно и наночастиц.

Целью работы является разработка и исследование ближнепольной приставки для макета изображающего НПВО-спектрометра, позволяющей реализовать метод ближнепольной зондовой сканирующей микроскопии. Данная приставка включает в себя датчик поверхности, обеспечивающего прецизионные измерения расстояния до поверхности, для высокоточного позиционирования рабочего зонда в области эванесцентной волны. Точностные требования к датчику определяются из требований к разрешающей способности установки в целом.

В самом первом приближении точность определения расстояния должна быть субволновой, или хотя бы на порядок выше, чем характерная глубина ближнепольной области (глубина проникновения эванесцентной волны). Это соответствует грубой погрешности определения расстояния 1 – 5 мкм. Однако, разрешение ближнепольной микроскопии определяется не длиной волны, а апертурой субволнового острья. При изготовлении такого острья с характерным размером менее 1 мкм и достаточным уровнем снимаемого сигнала требования к оптическому датчику могут быть ужесточены (до 0,1 – 0,5 мкм).

На основе обзора различных типов датчиков для высокоточного измерения сверхмалых расстояний до поверхности было предложено использовать конфокальный метод с хроматическим кодированием [3]. Этот метод является наиболее предпочтительным с точки зрения совокупности характеристик (достижимое разрешение, длина переднего рабочего отрезка, возможность измерения расстояния до наклонных поверхностей, отсутствие механических обратных связей, стоимость разработки и изготовления, массогабаритные характеристики). Датчики на основе этого метода позволяют измерять расстояния до блестящих, окрашенных и прозрачных сред, восстанавливать 3D профиль поверхности в сочетании с XY-сканированием.

Конфокальный метод с хроматическим кодированием

Рассмотрим суть конфокального метода, который иллюстрирует рис. 1. Объектив 2 строит изображения точек освещенной прозрачной среды 1 в плоскости 3, отрезки l и l' оптически сопряжены. В оптически сопряженную плоскость 3 помещают диафрагму малого диаметра. На рисунке видно, что в этом случае свет из точки A , находящейся в фокальной плоскости объектива 3 (сплошные линии) пройдет через диафрагму (точка A'), а засветка из остальных точек (пунктирные линии), в основном, задерживается диафрагмой. Тем самым, конфокальная диафрагма выполняет роль «пространственного фильтра», позволяющего снимать информацию только с отдельной тонкой плоскости образца вдоль оси Z . При скани-

ровании поверхности образца по спаду сигнала можно определять малейшие изменения расстояния с большой точностью. Моделирование этого метода показало, что при использовании $40\times$ объектива и диафрагмы диаметром 10 мкм характерная глубина пространственной фильтрации в области объекта составляет 1 мкм. Но этот метод не позволяет определять знак смещения и требует непрерывного микросканирования вдоль оптической оси рабочего объектива для регистрации (удержания) максимальной амплитуды сигнала на детекторе. Это при-

водит к уменьшению быстродействия системы в целом. Устранить этот недостаток может метод хроматического кодирования.

Рассмотрим принцип работы этого метода в геометрии ближнепольной приставки в схеме изображающего НПВО-спектрометра (рис. 2). Она включает в себя XYZ позиционирующую платформу на основе пьезоподвижек для прецизионного сканирования поверхности субволновым зондом и оптический конфокальный датчик с хроматическим кодированием.

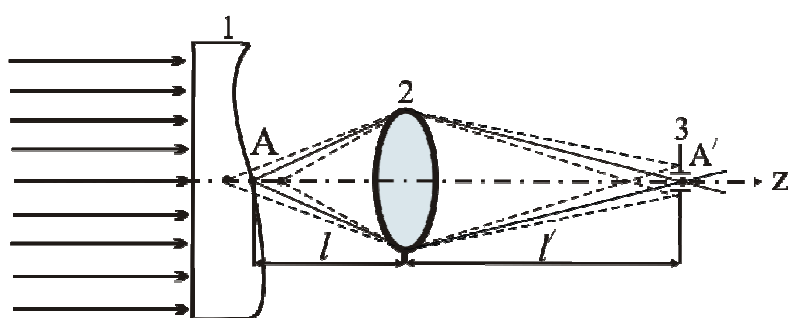


Рис. 1. Принципиальная схема конфокального датчика

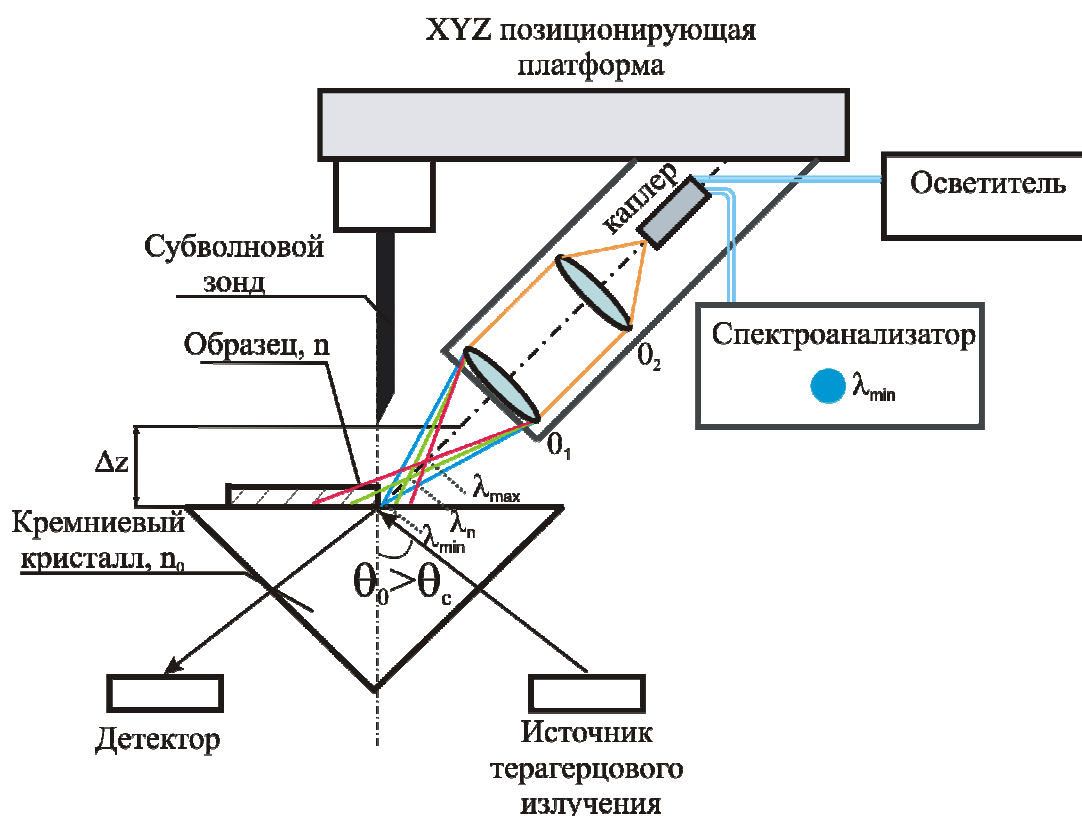


Рис. 2. Геометрия конфокального датчика поверхности в схеме изображающего НПВО-спектрометра

Излучение осветителя проходит через каплер (оптоволоконный светоделитель), расширяется объективом O_2 и фокусируется на поверхность кремниевого кристалла объективом O_1 под некоторым углом к оси зонда. Каплер представляет собой два многомодовых волокна, сваренных вместе, позволяющие объединять и или расщеплять световой поток. Рассеянный свет собирается объективом O_1 и фокусируется объективом O_2 на торец каплера, через который излучение попадает на спектроанализатор. Торце каплера выполняет роль конфокальной диафрагмы, его диаметр равен 50 мкм. Осветитель состоит из галогеновой лампы и объектива, который фокусирует излучение на торец каплера. Для реализации метода хроматического кодирования нами предложено использовать гибридный рефракционно-дифракционный объектив (РД-объектив) O_1 , который позволяет расщеплять падающий поток на хроматические составляющие в измерительном диапазоне ΔZ . В зависимости от расстояния до кремниевого кристалла на его поверхности фокусируется свет только с определенной длиной волны λ_{\min} из всего спектрального диапазона $[\lambda_{\min} \dots \lambda_{\max}]$. Все другие спектральные компоненты освещают широкую площадь поверхности. Использование конфокального принципа приводит к прохождению на спектроанализатор практически монохроматического света с длиной волны λ_{\min} , все остальные спектральные компоненты из диапазона ΔZ отсекаются. Длина волны λ_{\min} является хроматическим кодом расстояния до объекта. По изменению λ_{\min} судят о величине смещения.

РД-объектив состоит из стандартного микрообъектива ($40\times$, $f = 4.3$ мм) и дифракционного оптического элемента (ДОЭ). ДОЭ представляет собой фазовую зонную пластинку с окружностями, радиус которых совпадает с радиусами зон Френеля. Фокус ДОЭ определяется формулой:

$$F = \frac{r_n^2}{2n\lambda},$$

где r_n – радиус n -й зоны, n – номер зоны.

На ДОЭ лучи дифрагируют, а микрообъектив осуществляет фокусировку (рефракцию) дифрагированных лучей. Отсюда название объектива – дифракционно-рефракционный. Следует отметить, что в существующих зарубежных аналогах для

формирования хроматического отрезка используется набор линз из особы стекол, за счет которых объектив имеет увеличенный хроматизм положения. Коэффициент преломления синих лучей, как правило, больше, чем красных, поэтому их фокус расположен ближе к задней главной точке линзы, чем фокус красных лучей. Применяв вместо такой комбинации линз ДОЭ, можно существенно упростить конструкцию и уменьшить массогабаритные характеристики конфокального датчика.

РД-объектив был рассчитан с помощью программного пакета ZEMAX. Метод расчета основан на алгоритмах оптимизации параметров оптической системы. В нашем случае, оптимизируемыми параметрами являлись коэффициенты полинома, описывающие фазу волнового фронта ДОЭ:

$$\Phi = \sum_{i=1}^N A_i \rho^{2i},$$

где N – число членов (коэффициентов) ряда, A_i – коэффициент члена ряда при ρ , ρ – нормированная радиальная координата апертуры поверхности.

В качестве критерия оптимизации было выбрано следующее требование: величина сфокусированного пятна в фокальной плоскости должна быть минимальной для длины волны $\lambda_{\max} = 650$ нм. Чтобы смоделировать диапазон разложения по длинам волнам, задаем фиктивную плоскость на расстоянии ΔZ от фокальной плоскости микрообъектива и определяем оператор оптимизации кружка рассеяния на этой поверхности для длины волны $\lambda_{\min} = 450$ нм из диапазона ΔZ . В результате оптимизации получаем значения коэффициентов полинома.

Были рассчитаны и изготовлены два ДОЭ с $\Delta Z = 100$ и 200 мкм в бинарном фазовом исполнении в КТИ НП СО РАН на круговой лазерной записывающей системе CLWS-300/C-M [4]. Экспериментальная апробация ДОЭ описана ниже.

Для реализации метода хроматического кодирования на выходе каплера необходим спектроанализатор. Это может быть спектрометр, требования к разрешению к которому определяются следующим образом. Если длина хроматического отрезка $\Delta Z = 200$ мкм, то для того, чтобы измерять смещение порядка 1 мкм разрешение спектроанализатора должно быть порядка 1 нм

$(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})/\Delta Z = 200 \text{ нм} / 200 \text{ мкм}$ или $1 \text{ нм} / 1 \text{ мкм}$). Нами предложено в качестве спектроанализатора использовать цветную камеру, которая позволяет вычислять значения координат цвета R , G , и B . Усредняя или интерполируя данные по всем элементам изображения – пикселям, получим средние значения $R_{\text{ср}}$, $G_{\text{ср}}$, и $B_{\text{ср}}$. Зная эти координаты и пользуясь трехкомпонентной теорией цвета, можно определить доминирующую длину волны $\lambda_{\text{д}}$, т. е. такую длину волны излучения, на которой в спектре имеется преобладающее по мощности излучение [5]. Следует отметить, что такой метод не достигает абсолютной точности спектрометра, однако он вполне подходит для сравнительных измерений смещения конфокальным датчиком. Использование цветной камеры

позволит уменьшить себестоимость датчика и в целом и упростить его конструкцию.

Экспериментальные результаты

Экспериментальные исследования конфокального метода осуществлялись на макете с использованием в качестве источника галогеновой лампы или белого светодиода, а в качестве спектроанализатора – цветной видеокамеры (TUCSEN 1.3 Мр). Объект смещался с помощью пьезоподвижек фирмы Physik Instrumente (PI) с шагом 1 мкм и точностью позиционирования $0,2 \text{ мкм}$. На рис. 3 представлены графики, показывающие зависимость длины волны на спектроанализаторе в зависимости от расстояния до объекта при глубине фокусировки

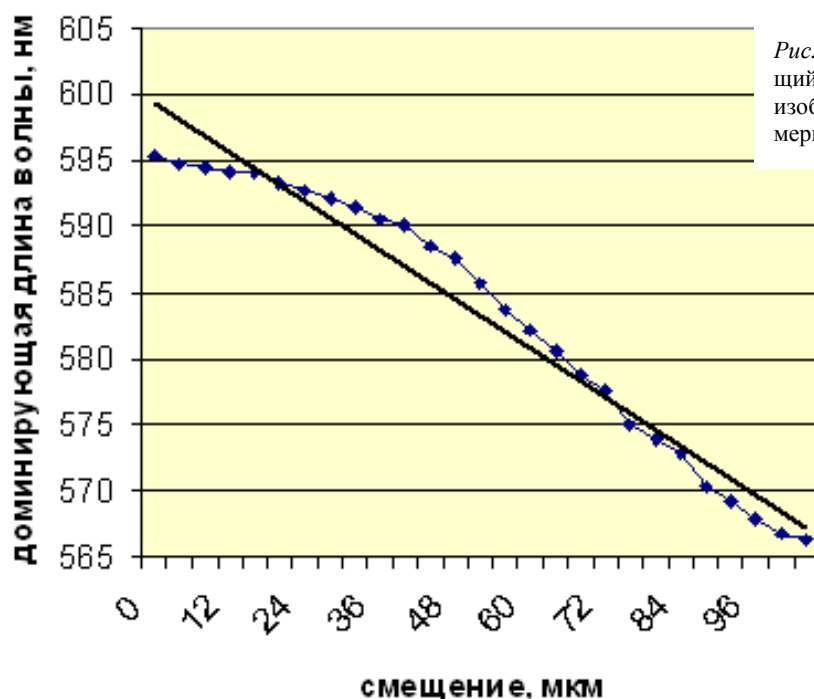


Рис. 3. Зависимость доминирующей длины волны, рассчитанной по изображениям с цветной видеокамеры, от смещения поверхности

$\Delta Z = 100 \text{ мкм}$. Из графика видно, что зависимость довольно линейная (нелинейность составляет 4%), а уровень локальных отклонений соответствует погрешности применяемого оборудования. Результаты эксперимента подтверждают возможность создания ближнепольной приставки на основе конфокального датчика с хроматиче-

ским кодированием с погрешностью меньше 1 мкм .

Основные результаты

Предложено использовать конфокальный метод с хроматическим кодированием для измерения сверхмалых расстояний для ис-

пользования в ближнепольной приставке изображающего НПВО-спектрометра.

Рассчитаны гибридные рефракционно-дифракционные объективы с различной глубиной фокусировки ($\Delta Z = 100$ и 200 мкм).

Проведено программное моделирование и экспериментальная апробация конфокального метода с хроматическим кодированием. Получена чувствительность к смещениям поверхности меньше 1 мкм.

Список литературы

1. *Gerasimov V. V., Knyazev B. A. and Cherkassky V. S.*, Obtaining spectrally selective images of objects in attenuated total reflection regime in real time in visible and terahertz ranges. *Optics and Spectroscopy*, 108 (2010) 859-865.

2. *Миронов В. Л.*, Основы сканирующей зондовой микроскопии // РАН Институт физики микроструктур, Нижний Новгород, 2004.

3. *Stern H., Metzger R.*, Chromatic optical ranging sensor // Пат. 5790242 США МКИ G01C3/08. – Оpubл. 04.08.1998.

4. *Kiryakov V. P.* (1997). Laser setup for flat optical components fabrication with submicron resolution. *Proc. SPIE* (Vol. 3091, pp. 66-70).

5. *Ginzhal A. V., Zavjalova M. A, Obidin Y. V.*, RGB image processing method for color classifying diamonds [Текст] // Proceedings of ISMTII-2009 (The 9th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments). Published by D.S. Rozhdestvensky Optical Society, Russia. Saint-Petersburg, Russia, 29 June – 2 July 2009. Vol. 4. P. 4-167 – 4-171.

20.09.2010