УДК 535.51; 621.382
На правах рукописи

Али Мохаммед

ХОЛОЭЛЛИПСОМЕТРЫ – СРЕДСТВА МОНИТОРИНГА В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ПОВЕРХНОСТИ АНИЗОТРОПНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ В КВАЗИНОРМАЛЬНО РАССЕЯННОМ И ОТРАЖЁННОМ СВЕТЕ

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» на кафедре **оптико-электронных приборов научных исследований**

Научный руководитель: **Кирьянов Анатолий Павлович,** доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Никитин Алексей Константинович,** доктор технических наук, доцент, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН

Шепелев Андрей Вадимович, доктор физико-математических наук, профессор, Московский государственный университет дизайна и технологии, текстильный институт им. А.Н. Косыгина

Ведущая организация: Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума, г. Москва

Защита диссертации состоится «9» октября 2013 г. в 10. 00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н

Ваш отзыв на автореферат диссертации в двух экземплярах, печатью организации, просим направлять по указанному адре секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
2034298
Али Мохаммед Холозлипсом

Автореферат разослан « 05 » сентября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета к.ф.-м.н. Семеренко Д.А.

2651

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Эффективность наукоёмких технологий сделала актуальным мониторинг поверхностных процессов при создании и обработке специальных материалов.

Наиболее доступными и оперативными для его реализации оказываются оптотехнические методы и устройства и, прежде всего, чувствительные к фазе световых волн интерферометрия и эллипсометрия.

За рубежом К. Амра и др. обратили внимание на рассеяние света и перестроили скаттерометр (измеряющий только интенсивность поляризованных пучков рассеянного света) в эллипсометре рассеяния с высоким угловым разрешением диаграммы. Но возникли трудности с измерением фазовых параметров, так как погрешность установки расстояния от фотоприёмников до источника рассеяния света должна составлять доли длины волны света. Кроме того, применяемая эллипсометрия способна измерять *in situ* (в реальном времени) только два параметра прозрачных оптически изотропных плёнок.

Холоэллипсометрия отражения света, которую предложил и развивает А.П Кирьянов как научное направление, обеспечивает мониторинг необходимо полным набором оптико-физических параметров объекта отражения света на основе регистрации *in situ* поляризованного света. И создание холоэллипсометра как средства обеспечения мониторинга нанокристаллов полным набором параметров при регистрации *in situ* нормально рассеянного и отражённого света представляется актуальной научно-технической задачей.

Целью работы является разработка метода, и создание средства эллипсометрии рассеяния и отражения света оптически одноосными двумерными кристаллами для реализации измерений и контроля в реальном времени оптико-физических параметров двумерных кристаллов при мониторинге их создания и обработки. Для достижения данной цели поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать концепцию лазерных холоэллипсометров рассеяния и отражения света оптически анизотропными нанокристаллами.
2. Разработать основы создания лазерного интерференционного асимметричного холоэллипсометра рассеяния света типа Маха-Цендера.
3. Разработать акустооптический спектрохолоэллипсометр рассеяния света.
4. Разработать и создать макет лазерного холоэллипсометра in situ с одновременным нормальным рассеянием и отражением поляризованного света одноосным кристаллом с бинарной модуляцией поляризации.

Методы исследования. Решение задач, определённых целью диссертации, проводилось с использованием современных методов экспериментальной физики и теоретического анализа оптико-физического состояния меняющих во времени свои параметры двумерных нанокристаллических систем.

Научная новизна результатов диссертации

1. Разработаны и созданы, развиты и апробированы метод лазерной холоэллипсометрии *in situ* на основе сочетания одновременно нормальных рассеяния и отражения света образцом оптически одноосного кристалла.

2. Создано средство реализации метода в виде лазерного холоэллипсометра *in situ* с нормальным одновременным рассеянием и отражением поляризованного света оптически одноосным нанокристаллом.
3. Разработан, создан макет лазерного холоэллипсометра как средства мониторинга в реальном времени на основе параллельного сочетания нормального рассеяния и отражения света образцом оптически одноосного двумерного кристалла с использованием бинарной модуляции поляризации.
4. Разработаны и применены принципы схемотехнической и функциональной организации акустооптических спектрохолоэллипсометров рассеяния и отражения, обеспечивающих одновременное и бесконтактное определение в режиме *in situ* полного спектрального набора оптических параметров двумерной оптически одноосной кристаллической наносистемы.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что при внедрении их в сектор реальной экономики обеспечивается возможность разрешить проблемы измерений в режиме *in situ* при осуществлении мониторинга синтеза и обработки различных оптически анизотропных кристаллических систем, в том числе и двумерных нанообразований, а также многие родственные по природе явлений проблемы каталитического мониторинга в химических и биотехнологичесеских реакторах.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, представленных в диссертации, обеспечена: корректностью постановки физических задач и их решения с помощью эксперимента и теоретического анализа на основе законов распространения поляризованных световых волн в слоистых средах; экспериментальной проверкой характеристик создаваемого макета лазерного холоэллипсометра.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации. Автор диссертации непосредственно участвовал во всех сторонах реализации данной работы.

Реализация и внедрение результатов.

Результаты, полученные в диссертационной работе, используются в научно-исследовательской и учебно-образовательной деятельности на кафедре физики «Московского государственного университета дизайна и технологии», и в работах по гос.контракту № П 648 от 19.05.2010 Министерства образования и науки РФ.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Концепция лазерной холоэллипсометрии и лазерных холоэллипсометров *in situ* рассеяния и отражения света одноосными двумерными нанокристаллами в качестве основы реализации мониторинга таких актуальных систем.
2. Принципы создания лазерного интерференционного асимметричного холоэллипсометра рассеяния света типа Маха-Цендера как средства реализации метода лазерной холоэллипсометрии *in situ* рассеяния света оптически одноосным двумерным нанокристаллом.
3. Макет лазерного холоэллипсометра *in situ* на основе параллельного сочетания нормального рассеяния и отражения света образцом оптически одноосного двумерного нанокристалла.

4. Конструкция и принцип действия акустооптического спектрохололлипсометра нормального рассеяния и отражения поляризованного света оптически одноосным нанокристаллическим образованием.

Апробация работы. Результаты исследований, были представлены на Международных научно-технических конференциях «Прикладная оптика», г. Санкт-Петербург, 2010 г. и 2012 г., на Всероссийской научно-технической конференции «Нанотехнологии и наноматериалы» г. Москва, 2010 г., на Международной Научно-технологической конференции «*Nanotechnology materials and systems*» г. Львов, Украина, 2011 г. и на Международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» г. Суздаль, 2013 г.

Публикации. Основные результаты работы изложены в 9 научных работах, в том числе 4 статьях в журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

Структура и объём диссертации. Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение, акт о внедрении результатов диссертации, список цитируемый литературы 74 наименований. Объём диссертации 150 страниц машинописного текста, включая 74 рисунка и 9 таблиц.

Содержание работы.

Во **введении** обоснована актуальность диссертации, формулируются её цели, приводятся основные результаты, отмечается их новизна и изложены защищаемые положения.

В **первой главе** представлены поляризация света и основы эллипсометрии, состоящие в измерении тех изменений в поляризации падающего на объект потока света, которые вызваны взаимодействием его с поверхностью тела или границей раздела сред. Эти изменения зависят и от свойств тел, и от частоты ν падающего света. Эллипсометрия, связывающая такие изменения с частотой света ν, известна как спектроэллипсометрия. Рассмотрена принципиальная схема эллипсометра как средства реализации метода эллипсометрии.

Представлено отношением ρ^* комплексных коэффициентов отражения R_{pp}^* и R_{ss}^* для линейно поляризованных *p*- и *s*-компонент потока света на образце S:

$$\rho^* = \left(R_{pp}^* / R_{ss}^*\right) = \left(R_{pp} / R_{ss}\right) \cdot \exp\left[i\left(\delta_p - \delta_s\right)\right], \quad (1)$$

или:

$$\rho^* = \rho \cdot \exp(i\Delta) = (tg\psi) \cdot \exp(i\Delta), \quad (2)$$

где

$$tg\psi = \rho = \left(R_{pp} / R_{ss}\right), \quad (3)$$

и

$$\Delta = \delta_p - \delta_s . \quad (4)$$

Основное уравнение эллипсометрии (2) задано эллипсометрическими параметрами (углами) образца ψ и Δ в (3) и (4).

В общем случае прямая задача эллипсометрии сводится к получению системы из двух действительных уравнений для параметров ψ и Δ:

Подчёркнуто, что измерения различных поверхностных систем в ходе их создания требуют соблюдения трёх независимых условий обеспечения эффективности таких усилий, а именно: (1) параллельности во времени получения некоторого массива необходимых для описания явлений оптико-физических параметров атомных слоёв или двумерных кристаллов (ДК), (2) быстродействия, адекватного характерным временам процессов в них, и (3) полноты получаемого

массива экспериментальных данных. Попытки иметь массив оптико-физических параметров анизотропного поверхностного слоя в виде оптически одноосного ДК на основе измерений *in situ* с помощью известных эллипсометров, способных дать параллельно только два в принципе эллипсометрических параметра ρ и Δ, приводят к ошибочным результатам даже при наличии реальной прозрачности в среде таких ДК. Поэтому актуальной и затребованной представляется впервые предложенная А.П.Кирьяновым и развиваемая в данное время как основа целого научного направления *холоэллипсометрия* – эллипсометрия необходимо полного набора определяемых параллельно оптико-физических параметров слоистых систем, реализуемая при этом разработкой и созданием соответственно адекватных приборных средств или *холоэллипсометров.*

Во **второй главе** представлен обзор по рассеянию света. Анализ рассеяния света следует вести с учётом квантовой природы фотонов как носителей электромагнитных возбуждений при описании их взаимодействия с такими квантовыми телами как атомы и молекулы вещества.

Дан обзор современных исследований по рассеянию света, позволивших расширить наши знания о таких особенностях микросистем, как шероховатости на границах сред и неоднородности внутри их объёмов. Но все эти исследования опирались на измерения только интенсивности рассеянного света. Понятно, что измерения фазовых параметров рассеянного света могут дать дополнительную и важную информацию о природе рассеяния света. И мотивацией дальнейших исследований стало расширение данных о рассеянии на основе измерений фазовых характеристик рассеянного света. Для решения такой задачи воспользовались идеей об интерференции потоков света, одного испускаемого источником света и другого частично рассеянного образцом. Но при её реализации возникли трудности, вызванные необходимостью вращать фотоприёмник так, чтобы разница в расстояниях от образца оставалась в пределах не более одной длины волны света. Один из путей решения такой задачи был предложен как наблюдение интерференции двух поляризованных потоков рассеянного света при обеспечении высокого углового разрешения при регистрации диаграммы рассеяния света. Иначе говоря, формулируется задача о разработке, создании и использовании эллипсометра с высоким угловым разрешением диаграммы рассеяния света. Более того, К. Амра и др. перестроили скаттерометр (прибор, измеряющий только интенсивность поляризованных пучков света) тем, что ввели в него вращающиеся анализатор и поляризатор и преобразовали его в эллипсометр с высоким угловым разрешением (ЭВУР) пространственного распределения вариации интенсивности и фазы рассеянного света в заданном направлении в пространстве.

В **третьей главе** представлены результаты оригинальных исследований.

Представлены типичные образцы двумерных кристаллов и их характеристики. ДК – характерные квантовые образования толщиной от 10 до 100 нм, которая заметно меньше других размеров. ДК очень интересны для нанотехнологий, имеющих дело с *квантовым копированием* тел из малого числа частиц.

На Рис.1 представлен перспективный лазерный интерференционный асимметричный холоэллипсометр *in situ* в качестве средства мониторинга ДК на основе рэлеевского рассеяния лазерного излучения.

Он организован как двулучевой интерферометр Маха-Цендера (ИМЦ). В ходе его работы лазер Л посылает пучок света на светоделитель $СД_1$, делящий его на основной информационный и референтный пучки. Информационный пучок от линейного поляризатора $Р_1$ падает на двумерный кристалл ДК, частично рассеивающий его во все стороны, в частности, и по нормали к плоскости на линзу $Л_1$.

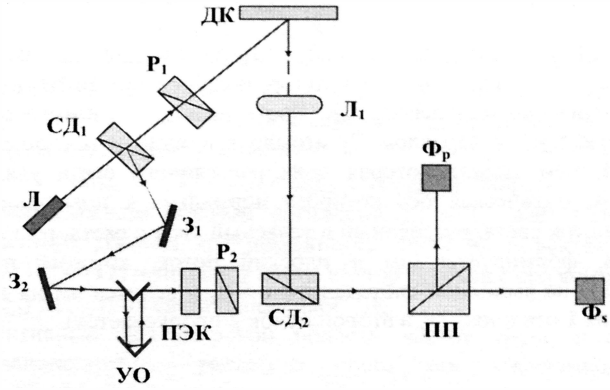

Рисунок 1. Лазерный интерференционный асимметричный холоэллипсометр

Она сводит падающий на неё свет в плоский пучок на светоделителе $СД_2$. Зеркала $З_1$ и $З_2$ направляют референтный пучок от светоделителя $СД_1$ через пьезоэлектрический коммутатор ПЭК и линейный поляризатор $Р_2$ на светоделитель $СД_2$. Падающие на него пучки света смешиваются и интерферируют. Уголковый отражатель УО сохраняет траекторию падения референтного пучка на светоделитель $СД_2$ и модулирует по закону синуса слагаемое $\delta\psi(t)$ в фазе $\psi_{p,s}(t)$ электрических векторов $E_{p,s}(t)$. При фазовой модуляции колебаниями на частоте Ω уголкового отражателя УО получают интерференционные сигналы $\Delta I_{(p,s)(u,э)\Omega}$ с выходов фотоприёмников Φ_p и Φ_s, пропускаемых резонансной системой приёма электрических сигналов, настроенной на частоту модуляции Ω, а также системами синхродетектирования и цифровки:

$$\Delta I_{p(u,э)\Omega} = 2I_{0p}\left|A^*_{up}A^*_{pp}\right|J_1(\delta\psi_M)\Big|_\Omega S_{p(u,э)}\sin\left[\Delta\psi_0 + \varphi_{Sp(u,э)} + \Delta\varphi_{Ap}\right], \quad (5)$$

$$\Delta I_{s(u,э)\Omega} = 2I_{0s}\left|A^*_{us}A^*_{ps}\right|J_1(\delta\psi_M)\Big|_\Omega S_{s(u,э)}\sin\left[\Delta\psi_0 + \varphi_{Ss(u,э)} + \Delta\varphi_{As}\right]. \quad (6)$$

При наличии только рассеянного света, когда референтный пучок не пропускается пьезоэлектрическим коммутатором ПЭК, имеют сигнал $I_{p,s(u,э)}$:

$$I_{p,s(u,э)} = I_{0(p,s)}\left|A^*_{u(p,s)}\right|^2 S^2_{(p,s)(u,э)}. \quad (7)$$

Применяя полное (синусное S^F и косинусное C^F) фурье-преобразование интерферограмм (5) и (6), находят комплексные поляризационные амплитудные вектора рассеяния $S^*_{p,s}$ света двумерным кристаллом ДК и соответственно их модули $S_{p,s}$ и разность фаз $\varphi_{S(p,s)} - \varphi_{S(p,s)Э}$:

$$[S_{(p,s)}/S_{(p,s)Э}] = \left\{\left(S^F[\Delta I_{S\Omega}]_{(p,s)}\right)^2 + \left(C^F[\Delta I_{S\Omega}]_{(p,s)}\right)^2\right] / \left[\left(S^F[\Delta I_{Э\Omega}]_{(p,s)}\right)^2 + \left(C^F[\Delta I_{Э\Omega}]_{(p,s)}\right)^2\right]^{1/2}, \quad (8)$$

$$\varphi_{S(p,s)} - \varphi_{(p,s)Э} = Arctg\left\{C^F[\Delta I_{S\Omega}]_{(p,s)} / S^F[\Delta I_{S\Omega}]_{(p,s)}\right\} - Arctg\left\{C^F[\Delta I_{Э\Omega}]_{(p,s)} / S^F[\Delta I_{Э\Omega}]_{(p,s)}\right\}. \quad (9)$$

На Рис. 2 представлен оригинальный вариант лазерного холоэллипсометра для анализа поляризации рассеянного света, содержащего 4 измерительных канала.

Лазер Л посылает поток света через стоящие на входе устройства светоделитель $СД_i$, бинарный модулятор поляризации БМП и зеркало $З_1$ на образец S оптически одноосного ДК. Часть падающего потока света образец S отражает зеркально и зеркалом $З_2$ отсылает в камеру поглощения КП; часть рассеивается, при этом некоторая доля рассеянного света улавливается коллиматором К, оптическая ось которого нормальна к поверхности образца S. Собранный поток света, рассеянный в телесный угол с раствором $\Delta\theta_r \approx 2{,}5°$ к оси коллиматора, формируется им в плоский поток, который проходит через компенсатор С на выходной светоделитель $СД_e$ и делится им на два пучка света (первый пучок 1 отклоняется, а второй пучок 2 пропускается).

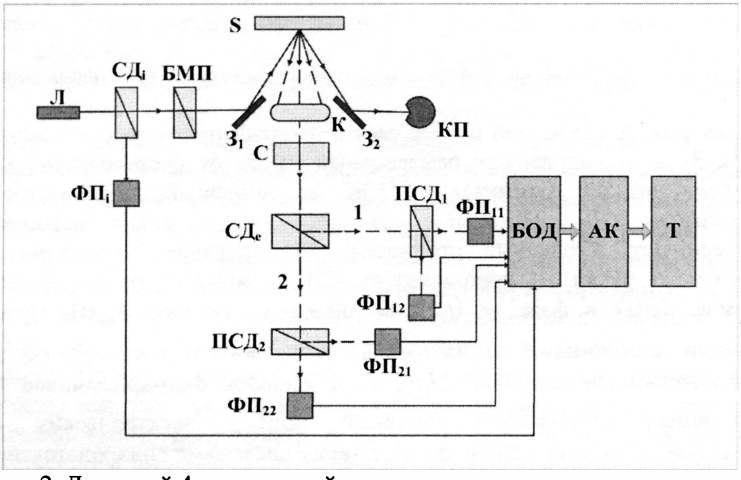

Рисунок 2. Лазерный 4–хканальный холоэллипсометр нормально рассеянного света

На их пути стоят поляризационные светоделители $ПСД_{1,2}$. Они делят падающие на них пучки света на подпучки с линейными взаимно перпендикулярными поляризациями, которые на выходе светоделителя $ПСД_1$ совпадают с линейными p- и s-поляризациями света на выходном светоделителе $СД_e$, а на выходе светоделителя $ПСД_2$ повёрнуты по азимуту на угол ±45° к поляризации подпучков на выходе из $ПСД_1$. На пути отходящих от светоделителей $ПСД_{1,2}$ подпучков света (11,12) и (21,22) стоят фотоприёмники $ФП_{(11,12)}$ и $ФП_{(21,22)}$,

выдающие одновременно интенсивности (I_{11}, I_{12}) и (I_{21}, I_{22}) этих подпучков. Светоделитель $СД_i$ делит падающий на него поток света на два потока: один пропускается на ПМБ, а другой отклоняется на $ФП_i$ с целью контроля интенсивности света I_i на входе устройства. Модулятор БМП поочерёдно пропускает на входное зеркало $З_1$ и далее на образец S поток света с линейной p- или s-поляризацией, соотнесённой с собственной линейной p- или s-поляризацией света на светоделителе $СД_e$. Сигналы от фотоприёмников поступают в блок обработки данных БОД. Сигнал $I_{11,12}$ связан с параметрами вектора Джонса для рассеянного света:

$$I_{11,12\,(и,э)} = I_{op,s} A^2_{p,s} S^2_{(\xi,\eta)(и,э)}. \qquad (10)$$

Здесь $I_{op,s}$ – интенсивность p- и s-компонент на входе светоделителя $СД_i$; $A_{p,s}$ – модули аппаратных функций для них; $S_{(\xi,\eta)(и,э)}$ – модули компонент вектора Джонса при рассеянии света на исследуемом (и) и эталонном (э) образцах. Разность $\Delta I_{\pm(и,э)}$ для сигналов I_{21} и I_{22}:

$$\Delta I_{\pm(и,э)} = |\, I_{21} - I_{22}\,| = 2[I_{21\,(и,э)} \cdot I_{22\,(и,э)}\,]^{1/2} \sin[\Delta\varphi_{(и,э)}], \qquad (11)$$

нормированная должным образом сигналами I_{11} и I_{12} даёт разность фаз $\Delta\varphi$ компонент вектора Джонса для рассеянного света на объектах (и, э). Тогда соотношения (10) и (11) позволяют найти вектор Джонса с его компонентами $S^{\bullet}_{\xi,\eta} = S_{\xi,\eta} \exp(i\Delta\varphi_{и,э})$ рассеяния света одноосным ДК.

Перспективный для широкой области частот света акустооптический спектрохолоэллипсометр рассеяния света как эффективного средства диагностики поверхностей тел и двумерных кристаллов представлен оптической схемой на Рис. 3.

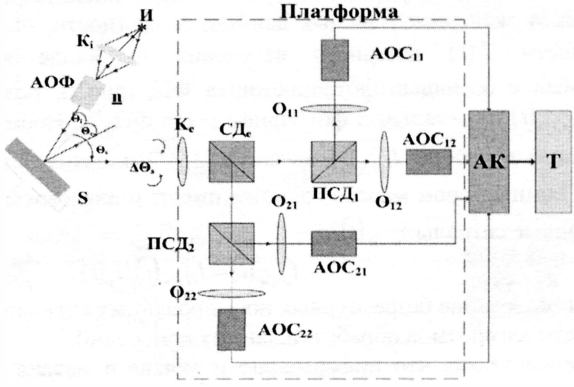

Рисунок 3. Акустооптический спектрохолоэллипсометр рассеяния света

Здесь И – источник света с широкой полосой частот ν; К и K_e – входной и выходной коллиматоры; АОФ – акустооптический фильтр; S – образец двумерного кристалла (падающий на него под углом θ_i поток света он частично рассеивает во все стороны, причём некоторая доля рассеивается в направлении под углом θ_s в световом конусе с малым углом раствора $\Delta\theta_s$); $СД_e$ – светоделитель; $ПСД_{1,2}$ – поляризационные светоделители; $AOC_{(11,12)}$ и $AOC_{(21,22)}$ – акустооптические спектрометры 1 и 2 в каналах поляризационных измерений;

$O_{(11,12)}$ и $O_{(21,22)}$ – объективы, собирающие потоки света на спектрометрах $AOC_{(11,12)}$ и $AOC_{(21,22)}$; АК – автономный компьютер; М –табло. Для программно выделяемой длины волны λ света работа данного устройства протекает сходным образом с работой описанного ранее 4-хканального холоэллипсометра (Рис.2).

В **четвертой главе** подчёркнуты три главных условия эффективности измерений: *параллельность* во времени, *быстродействие* и *полнота* массива данных. Пучки парциальных волн рассеянного света на выходе из прозрачного слоя сверхмалой толщины d модулируются комплексным амплитудным коэффициентом эффективного выхода $t^*_{eff}(\nu',\theta_s,d)$. Этот факт требует понимать эффективными и матрицу $\hat{S}_{eff}$ Джонса, и её компоненты S^*_{effuv}, описывающей не просто рассеяние света, но и рассеяние, и распространение его в среде, в которой находятся атомные частицы, взаимодействующие с падающим на них светом. Итак, встала задача разработать и создать холоэллипсометр, обеспечивающий измерение *in situ* изменений поляризации лазерного излучения одновременно при рассеянии и отражении его одноосным двумерным нанокристаллом.

Разработанный вариант параллельного использования средств измерительной техники и методов холоэллипсометрии *in situ* как рассеяния, так и отражения света, отличается от устройства на Рис.2 тем, что вместо камеры поглощения КП размещается холоэллипсометр отражения, выполненный идентично холоэллипсометру рассеяния. Но такое принципиальное в целом решение поставленной задачи усложняется громоздкой конструкцией устройства.

Получены основные уравнения в качестве методологической основы как организации и анализа работы лазерных холоэллипсометров, так и обработки всего массива экспериментальных данных. В частности, отметим, что контроль интенсивности $I_i(t)$ лазерного излучения на входе в холоэллипсометр, выполняемый с помощью фотоприёмника $ФП_i$ (рис.2), позволяет нормировать сигналы $I_{(s,r)k}(t)$ от остальных фотоприёмников $ФП_{(s,r)k}$. Нормировка есть деление (k)-го сигнала в наборе $I_{(s,r)k}(t)$ на сигнал $I_i(t)$от потока света на входе. При обработке компьютером массива данных имеют и аналоговые сигналы $I_{(s,r)k}(t)$, и нормированные сигналы $i_{(s,r)k}(t)$:

$$i_{(s,r)k}(t) = I_{(s,r)k}(t)/I_i(t), \qquad (12)$$

причём использование безразмерных нормированных сигналов (12) способ-ствует устойчивости алгоритмов обработки данных измерений.

Отметим также, что информацию о вкладе в массив данных со стороны других, отличных от образцаS, оптических элементов несут комплексные поляризационные аппаратные функции $A^*_{p,s}$:

$$A^*_{p,s} = A_{p,s} \cdot \exp(i\delta_{Ap,s}),$$

где $A_{p,s}$ и $\delta_{Ap,s}$ – модуль и фаза комплексной функции $A^*_{p,s}$.

В холоэллипсометре вклад функций $A^*_{p,s}$ в массив данных в виде сигналов $i_{jk}(t)$ для компонент потока света с линейными p- и s-поляризациями от образца S

исключают предварительными дополнительными измерениями на эталонном образце (эталоне) $S_э$.

Показан нетривиальный результат в виде принципиальной возможности кардинального упрощения как конструкции, так и функционирования устройства в целом, включая разработку и реализацию пакетов алгоритмов для обеспечения эффективной обработки *in situ* всего массива получаемых экспериментально данных. И такая возможность была продемонстрирована анализом работы лазерного двухканального холоэллипсометра *in situ* нормального рассеяния света одноосным двумерным кристаллом благодаря применению бинарной модуляцией поляризации света.

На Рис. 4 приведена оптическая схема оригинального впервые разработанного и созданного макета лазерного 4-хканального холоэллипсометра параллельных нормальных рассеяния и отражения света образцом одноосного кристалла с применением бинарной модуляцией поляризации. Внешний вид этого макета лазерного 4-хканального холоэллипсометра *in situ* дан на Рис. 5.

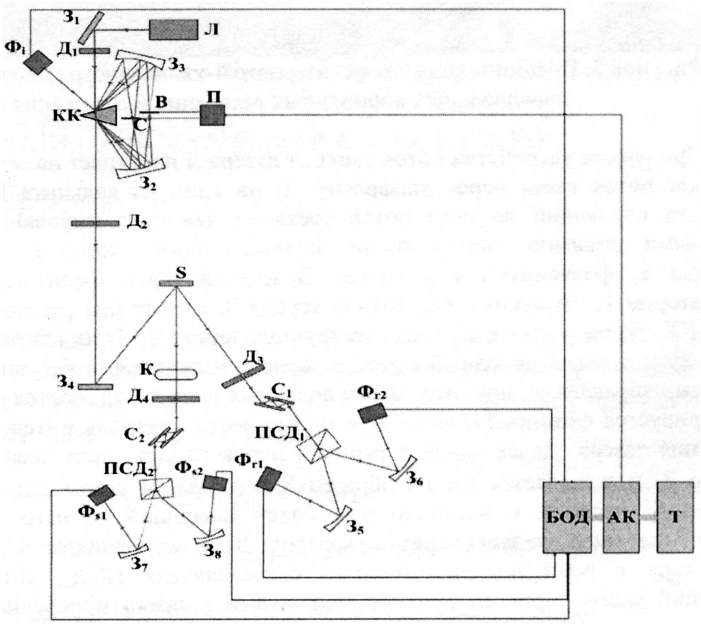

Рисунок.4. Схема макета лазерного 4-хканального холоэллипсометра параллельных нормальных рассеяния и отражения света

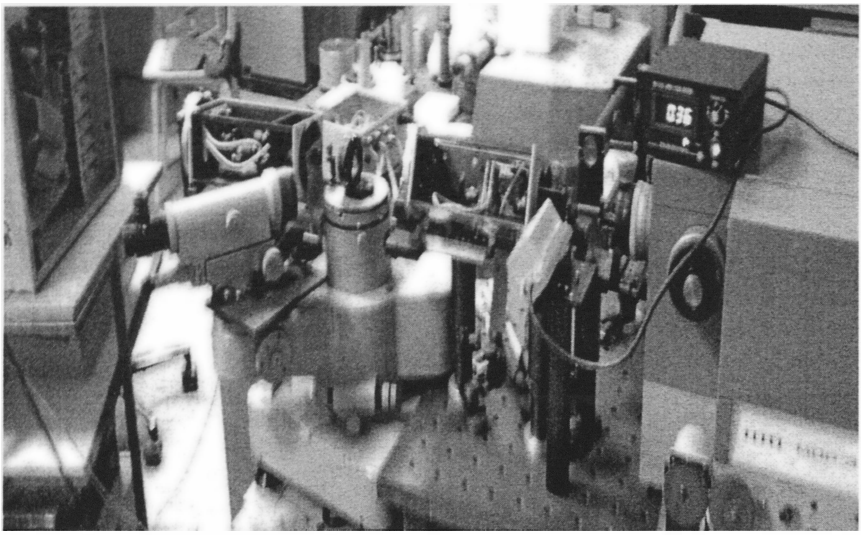

Рисунок 5. Внешний вид макета лазерного 4-хканального холоэллипсометра параллельных нормальных рассеяния и отражения света

При работе устройства поток света от лазера Л поступает на зеркало $З_1$, Оно посылает поток света через диафрагму $Д_1$ на клин из кальцита КК, который разделяет падающий на него поток света на два коллимированных пучка с линейными взаимно поперечными поляризациями, которые сферическим зеркалом $З_2$ фокусируются в точках В и С и по очереди перекрываются обтюратором П. Фокусные расстояния зеркал $З_2$ и $З_3$ равны расстояниям их до клина КК. Далее пучки снова коллимируются зеркалом $З_3$ на клине КК в то же место, куда и падал исходный пучок лазерного излучения, и бегут по очереди в прежнем направлении, при этом малая доля этих пучков отражается клином КК и регистрируется фотоприёмником $Ф_i$ с целью вести контроль интенсивности $I_i(t)$ излучения лазера. Далее каждый рабочий пучок падает через диафрагму $Д_2$ на зеркало $З_4$ и посылается им на образец S под малым углом падения $\theta_i \approx 5°$. Образец S отражает и частично рассеивает падающий на него поток света. Отражаемая часть падает через диафрагму $Д_3$ и компенсатор $С_1$ на призму Волластона в роли поляризационного светоделителя $ПСД_1$, который делит падающий поток света на пучки с линейными взаимно поперечными *p*- и *s*-поляризациями. Сферические зеркала $З_5$ и $З_6$ фокусируют эти пучки на входы фотоприёмников $Ф_{r1}$ и $Ф_{r2}$.

Часть рассеянного света уходит от образца S (почти нормально к его поверхности под углом, меньшим угла падения, в конусе с углом раствора $\Delta\theta \approx 3°$) на вход коллиматора К, формирующего из конуса рассеянного света плоский поток. А он направляется через диафрагму $Д_4$ и компенсатор $С_2$ на поляризационный светоделитель $ПДС_2$, который делит падающий на него поток света на плоские пучки с линейными взаимно поперечными *p*- и *s*-поляризациями. Сферические зеркала $З_7$ и $З_8$ фокусируют эти пучки света на входы

фотоприёмников Φ_{s1} и Φ_{s2}. Электрические сигналы от всех фотоприёмников Φ_i, Φ_{r1}, Φ_{r2}, Φ_{s1} и Φ_{s2} поступают в блок обработки данных БОД и от него в оцифрованном виде на компьютер АК, который проводит обработку получаемого массива данных и управляет всеми операциями. Данные могут выводиться на табло монитора Т.

Дан расчёт модулей $B_{\xi,\eta}$ и разности Δ фаз $\varphi_{\xi,\eta}$ компонент $B^*_{\xi,\eta}$ матрицы В Джонса нормального рассеяния или отражения света. Пусть оптическая ось ξ образца S из одноосного кристалла образует угол α с линейной р-поляризацией потока света на образце S, $E_{i(\xi,\eta)}$ – проекции электрического вектора $\mathbf{E}_i$ световой волны вдоль её линейных ξ- и η-поляризаций на входе в образец S. Линейно поляризованная световая волна при нормальном падении, войдя из вакуума в среду одноосного кристалла, разделяется на плоские потоки волн с линейными взаимно поперечными поляризациями необыкновенной и обыкновенной световых волн. Комплексные амплитуды векторов $\hat{E}^*_{pe}$ и $\hat{E}^*_{se}$ на выходе из кристалла находят по формализму векторов и матриц Джонса.

Интенсивности $I_{(p,s)ep}$ и $I_{(p,s)es}$:

$$I_{pep} = I_{pi}\left[\left|\hat{A}^*_p\right|^2\left(B^2_\xi\cos^4\alpha + B^2_\eta\sin^4\alpha + B_\xi B_\eta\sin\Delta\varphi_{\xi\eta}\left(\sin^2 2\alpha\right)/2\right)\right]_e, \tag{13}$$

$$I_{ses} = I_{si}\left[\left|\hat{A}^*_s\right|^2\left(B^2_\xi\sin^4\alpha + B^2_\eta\cos^4\alpha + B_\xi B_\eta\sin\Delta\varphi_{\xi\eta}\left(\sin^2 2\alpha\right)/2\right)\right]_e, \tag{14}$$

$$I_{sep} = I_{pi}\left[\left|\hat{A}^*_p\right|^2\left|B^*_\xi - B^*_\eta\right|^2\right]_e\left(\sin^2 2\alpha\right)/2, \tag{15}$$

$$I_{pes} = I_{si}\left[\left|\hat{A}^*_s\right|^2\left|B^*_\xi - B^*_\eta\right|^2\right]_e\left(\sin^2 2\alpha\right)/2. \tag{16}$$

Сигналы I_{sep} и I_{pes}, согласно (15) и (16), равны нулю при $\alpha = 0$, что позволяет выбрать нужную ориентацию оптической оси ξ образца S. Для измерений на эталоне $S_э$, проводимых в режиме отражения при условии, что модули отражения $R_\xi = R_\eta = 1$, имеют:

$$I_{p,sэ} = \left|\hat{E}^*_{p,s}\right|^2_{eэ} = I_{p,si}\left|\hat{A}^*_{p,s}\right|^2_e. \tag{17}$$

Нормированные сигналы $i_{pep(s)}$ и $i_{ses(s)}$ от образца S согласно (12):

$$i_{pep} = \left[I_{pep}/I_{pi}\right] = \left[\left|\hat{A}^*_p\right|^2\left(B^2_\xi\cos^4\alpha + B^2_\eta\sin^4\alpha + B_\xi B_\eta\sin\Delta\varphi_{\xi\eta(s)}\left(\sin^2 2\alpha\right)/2\right)\right]_e, \tag{18}$$

$$i_{ses} = \left[I_{ses}/I_{si}\right] = \left[\left|\hat{A}^*_s\right|^2\left(B^2_\xi\sin^4\alpha + B^2_\eta\cos^4\alpha + B_\xi B_\eta\sin\Delta\varphi_{\xi\eta}\left(\sin^2 2\alpha\right)/2\right)\right]_e, \tag{19}$$

$$i_{sep} = \left[I_{sep}/I_{pi}\right] = \left[\left|\hat{A}^*_p\right|^2\left|B^*_\xi - B^*_\eta\right|^2\right]_e\left(\sin^2 2\alpha\right)/2, \tag{20}$$

$$i_{pes} = \left[I_{pes}/I_{si}\right] = \left[\left|\hat{A}^*_s\right|^2\left|B^*_\xi - B^*_\eta\right|^2\right]_e\left(\sin^2 2\alpha\right)/2, \tag{21}$$

а сигналы $i_{sepэ}$ и $i_{pesэ}$ от эталона $S_э$:

$$i_{(p,s)\epsilon(s,p)\flat} = \left|\hat{A}^{*}_{(p,s)}\right|^{2}_{e}. \qquad (22)$$

А для приведённые сигналы $i_{np(pep)}$, $i_{np(ses)}$ и $i_{np(sep)} = i_{np(pes)}$ от образца S:

$$i_{np(pep)} = \left[i_{pep}/i_{pep\flat}\right] = \left|\left(B_{\xi}^{2}\cos^{4}\alpha + B_{\eta}^{2}\sin^{4}\alpha + B_{\xi}B_{\eta}\sin\Delta\varphi_{\xi\eta}\left(\sin^{2}2\alpha\right)/2\right)\right|_{e}, \qquad (23)$$

$$i_{np(ses)} = \left[i_{ses}/i_{ses\flat}\right] = \left|\left(B_{\xi}^{2}\sin^{4}\alpha + B_{\eta}^{2}\cos^{4}\alpha + B_{\xi}B_{\eta}\sin\Delta\varphi_{\xi\eta}\left(\sin^{2}2\alpha\right)/2\right)\right|_{e}, \qquad (24)$$

$$i_{np(sep)\epsilon(pes)} = \left[\left|B_{\xi}^{*} - B_{\eta}^{*}\right|^{2}\right]_{e}\left(\sin^{2}2\alpha\right)/2 = \left(B_{\xi}^{2} + B_{\eta}^{2} - 2B_{\xi}B_{\eta}\sin\Delta\varphi_{\xi\eta}\right)\left(\sin^{2}2\alpha\right)/2. \qquad (25)$$

Исключая вырожденные случаи, когда угол α ориентации для оптической оси ξ кристалла равен 0, (π/4) или (π/2), и рассматривая невырожденные случаи для системы уравнений (23)–(25), когда угол α равен, например, (π/6), получаем систему шести независимых уравнений, которая позволяет найти как три параметра холоэллипсометрии рассеяния света: модули $S_{(\xi,\eta)}$ и разность $\Delta\varphi_{\xi\eta(s)}$ фаз $\varphi_{S\xi\xi}$ и $\varphi_{S\eta\eta}$ компонент $S^{*}_{(\xi,\eta)}$ матрицы $\hat{S}^{*}$ Джонса для рассеяния света, так и три параметра холоэллипсометрии отражения света: модули $R_{(\xi,\eta)}$ и разность $\Delta\varphi_{\xi\eta(r)}$ фаз $\varphi_{R\xi\xi}$ и $\varphi_{R\eta\eta}$ компонент $R^{*}_{(\xi,\eta)}$ матрицы Джонса $\hat{R}^{*}$ для отражения света.

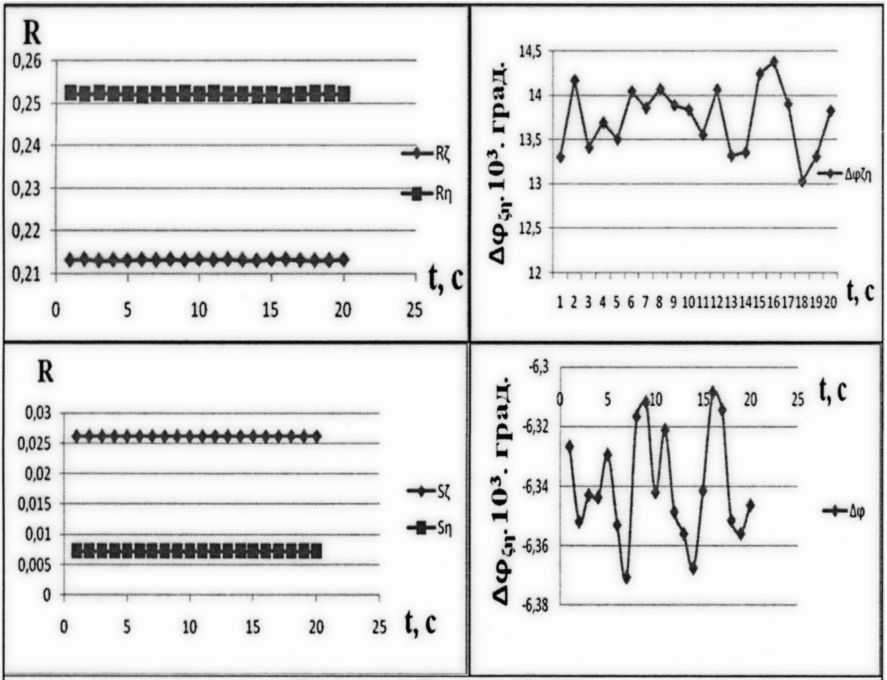

Рисунок 6. Кальцит $CaCO_3$

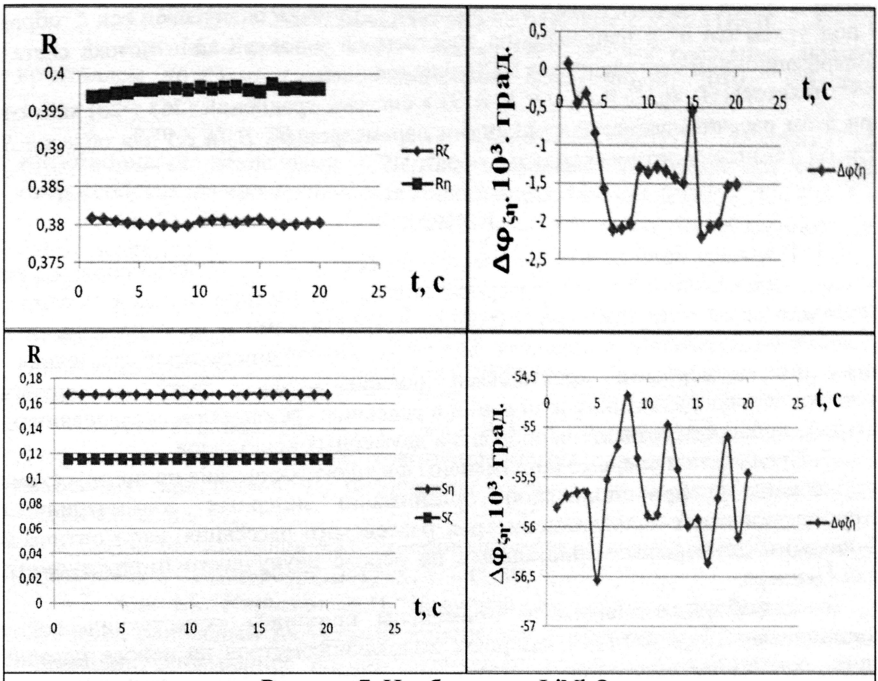

Рисунок 7. Ниобат лития $LiNbO_3$

Проведены контрольные измерения для модулей R_ξ и R_η комплексных амплитудных коэффициентов отражения $R^*_{(\xi,\eta)r}$ на кристаллических образцах из кальцита $CaCO_3$ и ниобата лития $LiNbO_3$ и сравнение их результатов *с* теоретическими расчётами модулей $R_{\xi th}$ и $R_{\eta th}$ на основе табличных данных.

Кальцит $CaCO_3$: $R_\zeta = 0{,}213 \pm 0{,}004$; $R_\eta = 0{,}252 \pm 0{,}006$.
$R_{\zeta th} = 0{,}196$; $R_{\eta th} = 0{,}250$.

Ниобат лития $LiNbO_3$: $R_\zeta = 0{,}380 \pm 0{,}017$; $R_\eta = 0{,}397 \pm 0{,}032$.
$R_{\zeta th} = 0{,}382$; $R_{\eta th} = 0{,}398$.

Результаты этих измерений в ситуации текущего во времени t экспериментов представлены также на Рис. 6 для $CaCO_3$ и рис.7 для $LiNbO_3$.

На основе уравнений (23)–(25) получена система соотношений, связывающих квадраты погрешностей $(\delta i_{\text{пр}(pep)})^2$, $(\delta i_{\text{пр}(ses)})^2$ и $(\delta i_{\text{пр}(sep)})^2$ для приведённых сигналов с квадратами погрешностей $(\delta B_\xi)^2$, $(\delta B_\eta)^2$ и $(\delta\Delta)^2$ параметров B_ξ, B_η и $\delta\Delta$ для образца *S*:

$$\left(\delta i_{np(pep)}\right)^2 = A_1\left(\delta B_\xi\right)^2 + B_1\left(\delta B_\eta\right)^2 + C_1\left(\delta\Delta\right)^2 + D_1\left(\delta\alpha\right)^2, \quad (26)$$

$$\left(\delta i_{np(ses)}\right)^2 = A_2\left(\delta B_\xi\right)^2 + B_2\left(\delta B_\eta\right)^2 + C_2\left(\delta\Delta\right)^2 + D_2\left(\delta\alpha\right)^2, \quad (27)$$

$$\left(\delta i_{np(sep)}\right)^2 = A_3\left(\delta B_\xi\right)^2 + B_3\left(\delta B_\eta\right)^2 + C_3\left(\delta\Delta\right)^2 + D_3\left(\delta\alpha\right)^2, \quad (28)$$

где $\delta\alpha$ – среднеквадратическая погрешность установки оптической оси ξ образца S под углом $\alpha \neq 0°$ к направлению собственной p-поляризации потока света на поляризационном светоделителе $ПСД_1$, отвечающему углу $\alpha_o = 0°$.

Факторы A_j, B_j, C_j и D_j (j = 1, 2, 3) в системе уравнений (26)–(28) являются при этом рассчитываемыми функциями параметров B_ξ, B_η и $\delta\Delta$ для образца S и угла $\alpha 1$ установки оптической оси ξ образца S.

ВЫВОДЫ

1. Показана принципиальная необходимость и актуальность использования метода и адекватных средств лазерной холоэллипсометрии *in situ* рассеяния и отражения света оптически анизотропными кристаллами и на основании этого предложена и развита концепция лазерных холоэллипсометров рассеяния и отражения двумерными кристаллами поляризованного света в интересах практики оптико-физических измерений в реальном времени при исследованиях и контроле процессов создания и обработки двумерных кристаллов.

2. Предложены впервые и применены физико-технические принципы схемотехнической и функциональной организации лазерных асимметриичных интерференционных холоэллипсометров рэлеевского рассеяния света оптически одноосными двумерными кристаллами на основе двулучевого интерферометра Маха-Цендера.

3. Разработаны впервые и применены принципы схемотехнической и функциональной организации лазерных холоэллипсометров на основе параллельного сочетания рассеяния и отражения света как экспериментальных и технических средств, обеспечивающих одновременное, бесконтактное и неразрушающее определение в режиме полного теоретически необходимого набора оптико-физических параметров двумерной оптически одноосной кристаллической фактически прозрачной наносистемы.

4. Впервые разработан, создан и подвергнут контрольным испытаниям макет лазерного холоэллипсометра на основе параллельного сочетания нормального рассеяния и отражения света образцом оптически одноосного двумерного кристалла с использованием бинарной модуляции поляризации.

5. Разработаны конструкция и принцип действия акустооптического спектрохолоэллипсометра нормального рассеяния и отражения поляризованного света оптически одноосным нанокристаллическим образованием.

6. Разработаны и предложены рекомендации по практическому использованию в реальном секторе экономики макета лазерного холоэллипсометра на основе параллельного сочетания нормального рассеяния и отражения света образцом оптически одноосного двумерного кристалла в интересах реализации мониторинга процессов на поверхностях в различных нанотехнологических и биотехнологических реакторах.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Али М, Кирьянов А.П. Холоэллипсометрия рассеяния двумерным кристаллом // «Прикладная оптика-2010», С.-Петербург, 2010. Сб. трудов. Т.1. С. 22–25.

2. Али М., Кирьянов А.П. Холоэллипсометрия рассеяния света анизотропными нанослоями // Новые материалы и технологии НМТ-2010. Всероссийская научно-техническая конференция. Москва, 2010. Т. 3. – С.4–5.

3. Ali M., Kiryanov A.P. IR Fourier-transform spectroholoellipsometry of the light`s scattering by unixial films // XIII International Conference on Physics and Technology of Thin Films and Nanostructures. 2011, Ivano-Frankivsk, Ukraine.

4. Али М., Качурин Ю.Ю., Кирьянов А.П., Рыжова Т.А., Шапкарин И.П. Интерференционная холоэллипсометрия in situ прозрачного двумерного одноосного кристалла при нормальном отражении лазерного излучения // Вестник РУДН.–2012, № 1.– С.77–84.

5. Али М., Балашов А.А., Вагин В.А., Качурин Ю.Ю., Шапкарин И.П. Лазерные интерференционные холоэллипсометры для мониторинга двумерных одноосных кристаллов // Физические основы приборостроения. – 2012. Т.1, № 4. – С. 86–97.

6. Али М., Кирьянов А.П. Холоэллипсометр рассеяния света // «Прикладная оптика-2012», С.-Петербург, 2012. Т. 1. – С. 39.

7. Али М., Кирьянов А.П. Лазерный холоэллипсометр рассеяния света оптически одноосным двумерным кристаллом // Инженерный журнал: Наука и инновации. Электронное научно-техническое издание. Сер. Приборостроение. Оптотехника. – 2013, № 1 (13) – С. 1–12.

8. Ali M., Kiryanov A.P., Kovalev V.I., Kvasha I.V. Light-Diode Holoellipsometer with Binary Modulation of Polarization Employing Light Scattering from Uniaxial Bi-Dimension Crystal // Bullenin of Peoples` Friendship University of Russia. Series: Mathematics. Information Science. Physics. – 2013, № 2. – P.201–209.

9. Али М., Кирьянов А.П. Лазерный холоэллипсометр рассеяния и отражения света прозрачным оптически одноосным двумерным кристаллом // Труды VI Международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» (ARMIMP-2013) в г. Суздаль. Т. 1. – С.24–27.