

На правах рукописи

Суворова Анастасия Михайловна

**ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ
ИЗЛУЧЕНИЯ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ
ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Специальность 01.04.05 — Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

ТОМСК – 2009

Работа выполнена в вузовско-академической лаборатории нелинейной оптики Института электрофизики УрО РАН и Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Кундикова Наталия Дмитриевна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Шандаров Станислав Михайлович

кандидат физико-математических наук
Котова Светлана Павловна.

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики

Защита состоится 5 ноября 2009 года в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.267.04 в ГОУ ВПО "Томский государственный университет" по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, ауд. 119.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 34а.

Автореферат разослан 25 сентября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.267.04

Б.Н. Пойзнер

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Хотя поляризационные эффекты в оптике наблюдались еще тогда, когда их природа, обусловленная векторным характером светового поля, не осознавалась, всплеск интереса возник лишь после создания лазеров и их повсеместного использования в науке и технике. Поляризационные эффекты нашли широкое применение в медицине для исследования органических тканей, в астрономии для исследования свойств удаленных объектов, для локализации напряжений в прозрачных диэлектриках. Широкое распространение получили поляризационно-оптические методы исследования [1*], системы модуляции излучения [2*], в основе которых лежат поляризационные эффекты, компенсаторы поляризационно-модовой дисперсии [3*].

Необходимость исследования и использования поляризационных эффектов привела к появлению разнообразных методов создания световых пучков с заданным состоянием поляризации, методов контроля и трансформации состояния поляризации и разработке на их основе поляризационных систем.

Любая поляризационная система, как правило, включает один или несколько элементов, которые являются основными элементами преобразования состояния поляризации, а именно, линейный фазосдвигающий элемент, частичный линейный поляризатор, частичный циркулярный поляризатор, циркулярный фазосдвигающий элемент [4*]. Расширение возможностей поляризационных систем достигается за счет увеличения составляющих ее элементов, или увеличения числа ее свободных параметров, необходимых для настройки системы. Наиболее распространенным элементом для преобразования состояния поляризации является линейный фазосдвигающий элемент, или фазовая пластина с постоянным на заданной длине волны фазовым сдвигом Γ . Возможности такой пластины ограничены одной степенью свободы (поворот пластины вокруг оси распространения светового пучка).

Для увеличения количества степеней свободы можно либо использовать активные фазовые пластины (поляризационные элементы с переменным фазовым сдвигом) [5*], принцип действия которых основан на электрооптических эффектах в кристаллах, жидкостях и жидких кристаллах, либо использовать комбинацию двух фазовых пластин [6*]. В рассмотренных случаях для управления поляризационными свойствами систем используются принципиально разные методы. В первом случае изменяют фазовый сдвиг активного элемента Γ_v , во втором – угол между осями двух фазовых пластин.

Увеличение числа степеней свободы позволяет создавать поляризационные системы с новыми свойствами. Использование трех фазовых пластин с заданным фазовым сдвигом (пассивных фазосдвигающих элементов) позволило со-

здать перестраиваемую по длине волны полуволновую пластинку [7*]. Три свободных параметра дали возможность реализовать ахроматичные полуволновые и четвертьволновые системы Панчатнама [8*], а также перестраиваемую четвертьволновую систему без оптической активности [9*]. Использование четырех степеней свободы делает возможным независимое преобразование состояния поляризации одновременно двух спектральных компонент [10*].

Использование активных фазовых элементов с независимой системой управления величиной фазового сдвига [11*] дает дополнительные свободные параметры, и система из трех активных элементов может обеспечить преобразование любого состояния поляризации на сфере Пуанкаре в любое произвольное [12*].

Использование пассивных и активных фазовых элементов для увеличения числа свободных параметров в одной поляризационной системе позволило бы расширить перспективы и возможности применения сложных поляризационных устройств. Расширение функциональных возможностей поляризационных систем требует рассмотрения преобразования состояния поляризации в сложных оптических системах, состоящих из двулучепреломляющих сред с фиксированными и управляемыми фазовыми сдвигами.

Многолучевая интерференция многократно переотраженных волн оказывает существенное влияние на свойства простых поляризационных элементов [13*]. Очевидно, что для более сложных систем влияние интерференции увеличивается из-за большего количества поверхностей раздела сред. Для повышения точности преобразования состояния поляризации в многокомпонентных оптических системах необходимо учитывать влияние интерференции многократных переотражений на всех поверхностях.

Цель работы

Цель настоящей работы - теоретически и экспериментально определить особенности преобразования состояния поляризации когерентного излучения в многокомпонентных системах, состоящих из активного и пассивного фазовых элементов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) Исследование особенностей преобразования состояния поляризации двухкомпонентной системой, состоящей из активных и пассивных фазовых элементов с произвольным углом между их осями.

2) Исследование принципиальной возможности получения излучения с любым состоянием поляризации из линейно поляризованного излучения в двухкомпонентной системе, состоящей из активного и пассивного фазовых элементов, а также обратного преобразования эллиптически поляризованного излучения в линейно поляризованное с любым азимутом.

3) Исследование влияния интерференции многократных преотражений на особенности преобразования состояния поляризации в сложных оптических системах.

Используемые методы исследований

Для решения сформулированных задач в работе использовался комплексный подход, сочетающий известные экспериментальные методы и методы компьютерного моделирования:

- для расчета преобразования состояния поляризации в двухкомпонентной системе использовались матричный метод Джонса, теоремы Джонса и метод представления поляризации излучения на комплексной плоскости, традиционно используемые для решения задач поляризационной оптики.

- для расчета интерференционных явлений использовался модифицированный метод Джонса и метод точного преобразования уравнений Максвелла. На основе анализа литературы было показано, что сочетание указанных методов позволяет упростить расчет преобразования состояния поляризации в многослойных анизотропных системах.

- для изучения свойств четвертьволновой системы был предложен метод визуальной настройки системы с помощью вращающегося поляризатора и приемника излучения, в котором сочетается простота реализации и высокая точность.

- для изготовления ЖК ячейки использовалась традиционная технология, где нанесение слоев осуществлялось методом центрифугирования, установка толщины ЖК слоя производилась с помощью микроспейсоров, структура ячейки закреплялась светочувствительным клеем в ультрафиолетовой камере. Контроль параметров ячейки осуществлялся и емкостным методом, и интерферометрическим методом для повышения точности измерений.

- для определения фазового сдвига модулятора применялся ноль-эллипсометрический метод с компенсатором, величина фазового сдвига которого была оптимизирована, для получения наибольшей точности в конкретных экспериментальных условиях.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Система из двух фазовых элементов, чьи фазовые сдвиги $\Gamma_f = \text{const}$ и Γ_v , а угол между их оптическими осями φ управляется внешним воздействием, преобразует состояние поляризации излучения с эллиптичностью e_0 и положением большой оси эллипса поляризации Θ_0 в состояние поляризации с эллиптичностью e и положением большой оси эллипса поляризации Θ таким образом, что

$$\Theta = 0.5 \arctg \left(2 \frac{A}{B} \right), e = \text{tg } \xi. \quad (1)$$

Здесь A , B и ξ определяются следующими выражениями:

$$A = 0.5 \sin(4\varepsilon) \sin^2(0.5\Gamma_{\text{eff}}) + 0.5 \text{tg}(2\alpha) \times \\ \times \left[\sin^2(2\varepsilon) \cos \delta_0 (1 - \cos \Gamma_{\text{eff}}) + \sin^4 \varepsilon \cos(\Gamma_{\text{eff}} - \delta_0) + \cos^4 \varepsilon \cos(\Gamma_{\text{eff}} + \delta_0) \right],$$

$$B = \cos^4 \varepsilon + \sin^4 \varepsilon + \sin^2 (2\varepsilon) (\cos(\Gamma_{\text{eff}}) - 0.5) -$$

$$-2 \operatorname{tg}(2\alpha) \sin (2\varepsilon) \sin(0.5\Gamma_{\text{eff}}) [\cos (2\varepsilon) \sin(0.5\Gamma_{\text{eff}}) \cos \delta_0 + \cos(0.5\Gamma_{\text{eff}}) \sin \delta_0] ,$$

$$\sin(2\xi) = \sin (2\varepsilon) \sin (\Gamma_{\text{eff}}) \cos(2\alpha) + 0.5 \sin(2\alpha) \times$$

$$\times [2 \cos^4 \varepsilon \sin (\Gamma_{\text{eff}} + \delta_0) + 2 \sin^4 \varepsilon \sin (\delta_0 - \Gamma_{\text{eff}}) + \cos(\Gamma_{\text{eff}}) \sin^2 (2\varepsilon) \sin \delta_0] ,$$

где

δ_0 – параметры вектора Джонса на входе системы $J_0 \left(J_0 = \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \cdot e^{-i\delta_0} \end{pmatrix} \right)^\alpha$,

а Γ_{eff} , ε , θ – эффективные параметры системы, найденные из второй теоремы Джонса.

2. При распространении когерентного излучения с длиной волны λ через многослойный фазосдвигающий элемент, в котором только один слой обладает двулучепреломлением, а толщина каждого из отдельных слоев d_i меньше длины когерентности излучения L , зависимость фазового сдвига модулятора $\Gamma^{\text{coh}}(\lambda)$ отличается от той же зависимости для некогерентного излучения $\Gamma^{\text{unc}}(\lambda)$. Это отличие $\Delta\Gamma_v(\lambda) = \Gamma_v^{\text{coh}}(\lambda) - \Gamma_v^{\text{unc}}(\lambda)$ имеет осциллирующий по λ характер. Амплитуда осцилляций и их период зависят от оптической толщины каждого слоя $h_i = n_i d_i$ и величины двулучепреломления жидкокристаллического слоя $\Delta n = n_f - n_{\text{sl}}$. Для жидкокристаллического модулятора с параметрами $d_1 = d_7 = 500$ мкм, $d_2 = d_6 = 20$ нм, $d_3 = d_5 = 200$ мкм, $d_4 = 1$ мкм, и $\Delta n = 0,13$ в спектральном диапазоне $\lambda = 632 \div 634$ нм зависимость демонстрирует два вида чередующихся колебаний с периодами около 0,5 нм и около 50 нм, а амплитуды колебаний составляют примерно 20^0 и 100^0 .

3. При распространении когерентного излучения с длиной волны λ через четвертьволновую систему из двух одинаковых двулучепреломляющих пластин с фазовыми сдвигами Γ , толщина d которых меньше длины когерентности излучения L , и углом φ между их оптическими осями, зависимости углов настройки φ^L , φ^R от λ отличаются от зависимости $\varphi^{\text{unc}}(\lambda)$ для некогерентного излучения, носят осциллирующий характер и определяются величинами λ , d и Γ :

$$\operatorname{tg} \varphi^L = \left[- (F^2 - 1) \sin \Gamma \pm \sqrt{(F^2 - 1)^2 \sin^2 \Gamma - 4F^2 \cos (2\Gamma)} \right] / 2F,$$

$$\operatorname{tg} \varphi^R = \left[+ (F^2 - 1) \sin \Gamma \pm \sqrt{(F^2 - 1)^2 \sin^2 \Gamma - 4F^2 \cos (2\Gamma)} \right] / 2F. \quad (2)$$

Здесь значения Γ и коэффициенты амплитудного отношения F рассчитываются с учетом многолучевой интерференции в отдельных пластинах из выражений:

$$\Gamma = \operatorname{arctg} \left[\operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} n_f d \right) \frac{n_f^2 + 1}{2n_f} \right] - \operatorname{arctg} \left[\operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{sl}} d \right) \frac{n_{\text{sl}}^2 + 1}{2n_{\text{sl}}} \right],$$

$$F = \frac{E_{x0}/E_{y0}}{E_x/E_y} = \frac{n_f (n_{\text{sl}} + 1)^2 \sqrt{1 - 2 \frac{n_{\text{sl}} - 1}{n_{\text{sl}} + 1} \cos \left(2 \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{sl}} d \right) + \left(\frac{n_{\text{sl}} - 1}{n_{\text{sl}} + 1} \right)^2}}{n_{\text{sl}} (n_f + 1)^2 \sqrt{1 - 2 \frac{n_f - 1}{n_f + 1} \cos \left(2 \frac{2\pi}{\lambda} n_f d \right) + \left(\frac{n_f - 1}{n_f + 1} \right)^2}},$$

где E_{x0}, E_{y0} и E_x, E_y – амплитуды обыкновенной и необыкновенной волн на входе и выходе пластины, соответственно, n_f, n_{sl} – их показатели преломления.

Для когерентного излучения углы φ^L и φ^R , необходимые для получения право- и левоциркулярнополяризованного излучения, различны. Например, для пластин слюды с $d_1 = d_2 = 20$ мкм в спектральном диапазоне 680-700 нм отличие $\Delta\varphi^{RL} = \varphi^R \neq \varphi^L$ составляет 12° .

Достоверность научных положений и других полученных результатов

1. В пользу достоверности **I защищаемого положения** свидетельствует то, что представленные аналитические выражения получены строгим математическим способом в результате синтеза классических принципов эллипсометрии [Р.Аззам, Н. Башара. М: Наука, 1976] и следствия из первой теоремы Джонса [I.V.Goltser и др. Opt.Comm. 1993]. Теоретический расчет преобразования состояния поляризации излучения созданной составной двухкомпонентной системой с перестраиваемой оптической активностью находится в согласии с экспериментальными данными в пределах 5%.

2. Достоверность **II защищаемого положения** подтверждает то, что расчет зависимости фазового сдвига жидкокристаллического модулятора от длины волны излучения проведен независимо методом преобразования уравнений Максвелла и методом Хевенса-Кларка [I.Chernyаev и др, MCLC, 2008]. Кроме того, полученные результаты не противоречат расчетам и экспериментальным исследованиям пропускания подобных структур (определяется фазовым сдвигом) [A.Marquez и др, Optics Communication, 2006 ;Yong-Kyu Jang и др, Journal of App. Physics, 2007]. В пользу достоверности **II защищаемого положения** говорит тот факт, что представленные экспериментальные результаты подтверждают предположение о влиянии слоев стекла на пропускание жидкокристаллического модулятора, сделанное в работе [La Trong HUNG и др, Journal of App. Physics, 2005].

3. Достоверность **III защищаемого положения** основана на том, что результаты отдельных этапов расчета (определение фазового сдвига и амплитудного коэффициента пропускания) совпадают с результатами других авторов [D.A. Holmes, J.Opt. Soc. Amer. 1964; D. Clarke, Astronomy and Astrophysics, 2005], а расчет зависимости угла настройки от длины волны излучения в частном случае, когда длина когерентности излучения равна нулю, согласуется с результатами, описанными в литературе [И.В. Гольцер и др, Квантовая электроника, 1995]. В пользу достоверности **III защищаемого положения** свидетельствует повторение характера зависимости угла настройки от длины волны излучения в экспериментах с различными двухкомпонентными системами.

Научная новизна научных положений и других полученных результатов

1. Научная новизна **I защищаемого положения** заключается в том, что предложен принцип настройки поляризационных систем, который предполагает из-

менение угла между осями элементов и фазовых сдвигов отдельных элементов системы одновременно.

2. Научная новизна **II защищаемого положения** заключается в том, что методом точного преобразования уравнений Максвелла рассчитан фазовый сдвиг ЖК модулятора в широком спектральном диапазоне с учетом интерференции на всех его слоях и оценен вклад отдельных слоев ЖК модулятора в зависимость фазового сдвига от длины волны.

3. Научная новизна **III защищаемого положения** заключается в том, что теоретически и экспериментально исследован эффект интерференции многолучевых переотражений в двухкомпонентных четвертьволновых системах в широком спектральном диапазоне и показана принципиальная возможность использования многолучевой интерференции в двухкомпонентной системе для определения сдвига длины волны излучения.

Научная ценность защищаемых положений и других полученных результатов

1. Полученные в **I защищаемом положении** аналитические выражения позволяют характеризовать преобразование состояния поляризации излучения при его распространении через анизотропные двухкомпонентные системы и прогнозировать влияние параметров этих систем на результирующее состояние поляризации.

2. Разработанные согласно **II защищаемому положению** методики расчета интерференционных явлений позволяют прогнозировать состояние поляризации в слоистых системах и системах, где изменяется ориентация отдельных элементов перпендикулярно оси распространения пучка.

3. Установленные в **защищаемых положениях I и II** соотношения для свойств ЖК модулятора и четвертьволновой системы с учетом интерференции многократных переотражений обеспечивают оптимизацию по точности параметров этих объектов.

4. Расчет фазового сдвига ЖК модулятора с учетом его полной структуры согласно **защищаемому положению I** выявляет роль отдельных слоев в преобразовании состояния поляризации когерентного излучения.

Практическая значимость научных положений и других полученных результатов

1. Предложенный в **I защищаемом положении** смешанный принцип настройки поляризационных систем полезен для разработки автоматизированных систем нового класса, состоящих из активных и пассивных фазовых элементов. По сравнению с одиночными фазосдвигающими элементами и двухкомпонентными системами с фиксированным углом между осями элементов такие системы имеют дополнительные возможности настройки, позволяющие достигать оптимальную точность преобразования состояния поляризации в конкретных экспериментальных условиях.

Такие системы применимы в схемах эллипсометрии, в качестве пространственно-временных модуляторов излучения, в качестве компенсаторов поляризационно-модовой дисперсии и в экспериментальной оптике для создания требуемого состояния поляризации излучения.

Частные конфигурации предложенной системы обеспечивают вращение плоскости поляризации и преобразование линейной поляризации излучения в любое состояние поляризации при использовании всего двух степеней свободы. Предложенная в **I защищаемом положении** четвертьволновая система является альтернативой классическим поляризационным вращателям, четвертьволновой пластинке и распространенным системам преобразования состояния поляризации излучения, поскольку обладает дополнительными полезными свойствами и позволяет решать задачи вращения плоскости поляризации и преобразования линейной поляризации излучения в любое состояние поляризации без привлечения дополнительных дорогостоящих элементов или только автоматизированным способом.

2. Сформулированные в **II защищаемом положении** условия оптимизации структуры ЖК модулятора (на этапе изготовления) и вклада различных его слоев в преобразование состояния поляризации когерентного излучения снижают чувствительность фазового сдвига к многолучевой интерференции до пяти раз.

3. Сформулированные в **III защищаемом положении** результаты исследования влияния многолучевой интерференции на преобразование состояния поляризации перестраиваемой четвертьволновой пластинкой в широком спектральном диапазоне полезны для создания нового поляризационного метода измерения сдвига длины волны излучения в спектральном диапазоне шириной несколько нанометров с точностью несколько ангстрем.

Внедрение результатов работ и рекомендации по их дальнейшему использованию

Результаты диссертационной работы используются в лаборатории нелинейной оптики для преобразования состояния поляризации излучения с высокой точностью в отдельных экспериментальных установках и для изучения эффектов спин-орбитального взаимодействия фотона.

Разработанные методики используются для выполнения квалификационных работ бакалавров и магистерских диссертаций.

Результаты диссертации целесообразно использовать в ФИАН, Самарском филиале ФИАН, на физическом факультете МГУ для прогнозирования спектральных свойств ЖК модуляторов и определения параметров ячейки спектральными методами.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: конференциях молодых ученых института Электрофизики УрО РАН (2004, 2005, 2006, 2009 Екатеринбург); на международной конференции "20th

Congress of the International Commission for Optics (ICO20)" (August 21-26, 2005, Changchun, China); на четвертой международной конференции молодых ученых и специалистов "Оптика-2005" (17–21 октября 2005, Санкт-Петербург, Россия); на международной конференции "The 21st International Liquid Crystal Conference" (July 1 - 2, 2006, Keystone, Colorado, USA); на международной конференции "ICO Topical Meeting on Optoinformatics /Information Photonics'2006" (4–7 сентября 2006, Санкт-Петербург, Россия); на международной конференции "NATO Advanced Study Institute on Imaging for Detection and Identification" (July 23 - August 5, 2006, Ill Ciocco, Italy); на международной конференции "SPIE Optics and Optoelectronics" (April 16-19, 2007, Prague, Czech); на международной конференции "12th International Topical Meeting On Optics of Liquid Crystals" (October 1-5, 2007, Puebla, Mexico); на международной конференции "SPIE Conference on Defense and Security" (March 16-20, 2008, Orlando, Florida, USA); на международной конференции "NATO Advanced Study Institute. Unexploded Ordnance Detection and Mitigation" (July 20 - August 2, 2008, Ill Ciocco, Italy); XXI Century. Topical Meeting on Optoinformatics'08", (15-18 September, 2008, Saint-Petersburg, Russia); на всероссийской конференции "Шестой Самарский региональный конкурс-конференция студентов и молодых исследователей по оптике и лазерной физике" (19-22 ноября, 2008, Самара).

Полнота изложения материалов диссертации

Основное содержание работы представлено в докладах на региональных, всероссийских и международных конференциях, в 7 публикациях, включая 4 статьи в рецензируемых журналах.

Личный вклад автора

Большинство полученных результатов получено лично автором. Личный вклад состоит в непосредственном участии в постановке задач, разработке моделей, методов расчета и комплекса программ, создании экспериментальных установок и проведении измерений, анализе и интерпретации полученных результатов, формулировке основных научных выводов. Вклад основных соавторов заключается в постановке задач (Н.Д. Кундикова), совместном проведении отдельных экспериментов (И.И. Попков, Е.В. Бибикова), подготовки образцов (Ф.В. Подгорнов), обсуждении результатов исследования (Н.Д. Кундикова, Ф.В. Подгорнов, И.В. Черняев).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержащего 100 наименований цитируемой литературы. Общий объем диссертации, включая иллюстрации и таблицы, составил 140 машинописных страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи, указана научная новизна, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены результаты обзора методов преобразования состояния поляризации света и свойств поляризационных систем. На основе литературных данных рассмотрены задачи поляризационной оптики, проведен обзор основных типов поляризационных систем и явлений многолучевой интерференции в них.

Анализ литературы показал, что для применения методов поляризационной оптики в науке и практических приложениях необходимо решать следующие задачи: 1) получение излучения с определенным состоянием поляризации, 2) анализ состояния поляризации излучения, 3) трансформация состояния поляризации излучения, 4) измерение характеристик поляризационных систем, 5) создание поляризационных устройств с нужными параметрами.

В поляризационных устройствах используются четыре основных поляризационных элемента, а именно, линейный фазосдвигающий элемент, частичный линейный поляризатор, частичный циркулярный поляризатор, циркулярный фазосдвигающий элемент. В сложных устройствах используют активные и пассивные фазовые элементы, а также комбинации активных и пассивных фазовых элементов. Как правило, применяется либо комбинация пассивных элементов, и изменение свойств (настройка) осуществляется за счет изменения углов между осями отдельных элементов, либо комбинация активных элементов, и свободными параметрами являются фазовые сдвиги элементов.

При распространении излучения через плоскопараллельную пластину возникают многократные переотражения от границ раздела сред. Если излучение обладает высокой степенью когерентности, переотраженные волны интерферируют между собой и, как показал расчет, зависимость фазового сдвига анизотропной пластины Γ от длины волны λ становится периодической:

$$\Gamma = \operatorname{arctg} \left[\operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} n_f d \right) \frac{n_f^2 + 1}{2n_f} \right] - \operatorname{arctg} \left[\operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} n_{sl} d \right) \frac{n_{sl}^2 + 1}{2n_{sl}} \right],$$

здесь d – толщина пластины, n_{sl} , n_f – показатели преломления обыкновенного и необыкновенного луча соответственно. Периодическим становится и относительный амплитудный коэффициент пропускания F :

$$F = \frac{E_{x0}/E_{y0}}{E_x/E_y} = \frac{n_f (n_{sl} + 1)^2 \sqrt{1 - 2 \frac{n_{sl}-1}{n_{sl}+1} \cos \left(2 \frac{2\pi}{\lambda} n_{sl} d \right) + \left(\frac{n_{sl}-1}{n_{sl}+1} \right)^2}}{n_{sl} (n_f + 1)^2 \sqrt{1 - 2 \frac{n_f-1}{n_f+1} \cos \left(2 \frac{2\pi}{\lambda} n_f d \right) + \left(\frac{n_f-1}{n_f+1} \right)^2}}.$$

Здесь E_{x0} , E_{y0} и E_x , E_y – амплитуды обыкновенной и необыкновенной волн на входе и выходе пластины соответственно. С увеличением границ раздела сред в

системе влияние интерференции многократных переотражений на ее свойства возрастает. Для учета интерференционных явлений, возникающих в системах, состоящих из нескольких элементов, разработаны различные методы. Один из самых простых методов, позволяющих учесть интерференцию многократных переотражений в пластине, использование формулы Эйри для расчета коэффициента пропускания системы.

Однако, если система состоит из нескольких слоев или элементов, обладающих анизотропией, для описания ее свойств используют матричные методы. Достаточно распространенными методами являются матричный формализм Берремана [14*] и расширенный формализм матриц Джонса [15*]. Недостатками этих подходов является их математическая сложность. Относительно простой метод был разработан в работах Хевенса и Кларка [6*], где для описания каждого компонента оптической системы вводится матрица размером 4×4 .

Для учета интерференции многократных переотражений в системе можно использовать прямое перемножение матриц отдельных элементов, составленных с учетом многолучевой интерференции в них. Однако, из-за сложной конструкции систем иногда пренебрегают теми или иными составляющими элементами. Так, в ЖК модуляторах расчет проведен только для упрощенных структур.

Анализ литературы показал, что методы измерения параметров отдельных фазовых элементов можно условно разделить на две группы, в основе которых лежат измерение интенсивностей излучения и метод компенсации фазового сдвига одного из элементов фазовым сдвигом другого. Если через поляризационный элемент распространяется высококогерентное излучение, методы определения фазового сдвига имеют свои особенности и должны быть адаптированы для этого случая.

Во второй главе представлены результаты исследования преобразования состояния поляризации в системе с двумя степенями свободы, состоящей из активного и пассивного фазового элемента с произвольным углом между их осями, а также предложена конструкция системы, обладающей свойствами четвертьволновой системы с перестраиваемой оптической активностью.

Как известно из теоремы Джонса, систему из любого количества элементов можно заменить на эквивалентную систему, состоящую из простых элементов, и определить ее эффективные параметры. Если система обладает эффективным фазовым сдвигом Γ_{eff} и имеет ориентацию осей ϵ , а на вход системы подается излучение с фазовым сдвигом δ_0 и амплитудой обыкновенного и необыкновенного лучей $\cos \alpha$ и $\sin \alpha$ соответственно, то решение матричных уравнений дает следующее выражение для азимута большой оси эллипса поляризации на выходе системы:

$$\Theta = 0.5 \operatorname{arctg} \left(2 \frac{A}{B} \right), \quad (3)$$

где

$$A = 0.5 \sin(4\varepsilon) \sin^2(0.5\Gamma_{\text{eff}}) + 0.5 \operatorname{tg}(2\alpha) \times \\ \times \left[\sin^2(2\varepsilon) \cos \delta_0 (1 - \cos \Gamma_{\text{eff}}) + \sin^4 \varepsilon \cos(\Gamma_{\text{eff}} - \delta_0) + \cos^4 \varepsilon \cos(\Gamma_{\text{eff}} + \delta_0) \right],$$

$$B = \cos^4 \varepsilon + \sin^4 \varepsilon + \sin^2(2\varepsilon) (\cos(\Gamma_{\text{eff}}) - 0.5) - \\ - 2 \operatorname{tg}(2\alpha) \sin(2\varepsilon) \sin(0.5\Gamma_{\text{eff}}) [\cos(2\varepsilon) \sin(0.5\Gamma_{\text{eff}}) \cos \delta_0 + \cos(0.5\Gamma_{\text{eff}}) \sin \delta_0],$$

а угол эллиптичности ξ , необходимый для вычисления эллиптичности излучения по амплитуде e ($e = \operatorname{tg} \xi$), определяется следующим образом:

$$\sin(2\xi) = \sin(2\varepsilon) \sin(\Gamma_{\text{eff}}) \cos(2\alpha) + 0.5 \sin(2\alpha) \times \\ \times \left[2 \cos^4 \varepsilon \sin(\Gamma_{\text{eff}} + \delta_0) + 2 \sin^4 \varepsilon \sin(\delta_0 - \Gamma_{\text{eff}}) + \cos(\Gamma_{\text{eff}}) \sin^2(2\varepsilon) \sin \delta_0 \right]. \quad (4)$$

На основе полученных выражений легко установить влияние угла между осями пластин φ и фазового сдвига активного элемента Γ_v на эллиптичность и ориентацию эллипса поляризации на выходе системы при различных значениях азимута входной линейной поляризации α и фазового сдвига пассивного элемента Γ_f .

Полученные выражения позволили определить конфигурацию составной четвертьволновой системы с перестраиваемой оптической активностью. Получены выражения для расчета эллиптичности e и ориентации большой оси эллипса поляризации Θ на выходе системы. Оказалось, что эллиптичность излучения зависит только от азимута входной линейной поляризации α и не зависит от фазового сдвига активного элемента Γ_v , а угол поворота большой оси эллипса поляризации излучения равен половине фазового сдвига активного элемента:

$$e = \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \alpha \right), \quad \Theta = \frac{\pi}{4} - \frac{\Gamma_v}{2}. \quad (5)$$

Как видно из выражений (5), такая система позволяет получать любое состояние поляризации из исходной линейной поляризации, используя только две степени свободы: общая ориентация системы позволяет задавать значение эллиптичности на выходе системы, а фазовый сдвиг активного элемента – поворот эллипса поляризации. Система также позволяет получать линейно поляризованное излучение с любым азимутом из произвольного эллиптически поляризованного излучения.

В третьей главе приведены результаты расчета многолучевой интерференции в сложных поляризационных системах.

Известно, что двухкомпонентную систему можно использовать для преобразования линейно поляризованного излучения в циркулярно поляризованное, причем свойства системы меняются при изменении угла между осями пластин φ . Расчет свойств двухкомпонентной четвертьволновой системы показал, что зависимость угла φ от длины волны когерентного излучения носит быстроосциллирующий характер, а частота и амплитуда осцилляций зависит от длины

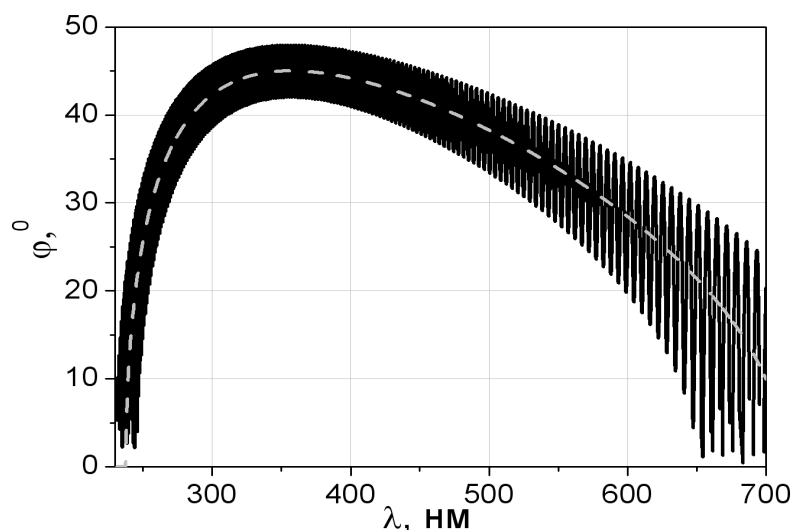


Рис. 1. Зависимость угла настройки четвертьволновой системы, состоящей из пластин слюды с величиной двулучепреломления $n_{s1} - n_f = 0.00446$ и толщинами $d_1 = d_2 = 20$ мкм от длины волны когерентного (сплошная линия) и некогерентного (пунктирная линия) излучения.

волны излучения и толщины пластин (рис. 1). Резкий характер зависимости угла между осями пластин от длины волны излучения, с одной стороны, затрудняет юстировку подобных систем по предварительному теоретическому расчету, с другой стороны, дает возможность измерения сдвига длины волны излучения в узком спектральном диапазоне с большой точностью.

ЖК модулятор (активный фазовый элемент) представляет собой многослойную среду с толщиной слоев порядка длины волны, поэтому многолучевая интерференция может значительно изменять зависимость фазового сдвига от длины волны излучения. Для расчета этой зависимости в работе использовался метод на основе точного преобразования уравнений Максвелла: рассчитывались фазы и амплитуды обыкновенного и необыкновенного луча на выходе модулятора по отдельности, а затем вычислялась результирующая разность фаз, что позволяло учитывать анизотропию структуры. Из рис. 2 видно, что зависимость фазового сдвига от длины волны когерентного излучения имеет быстроосциллирующий характер и значительно отличается от зависимости, полученной без учета многолучевой интерференции.

В результате численного моделирования показано, что для расчета фазового сдвига ЖК модулятора необходимо учитывать всю структуру как единое целое, так как вклад каждого слоя значителен, а пренебрежение внутренними слоями меняет характер спектральной зависимости фазового сдвига.

В четвертой главе содержатся результаты экспериментального исследования преобразования состояния поляризации в многокомпонентных поляризационных системах. Для реализации четвертьволновой пластинки с перестраиваемой оптической активностью была создана экспериментальная установка. Источником излучения служил HeNe лазер с длиной волны генерации $\lambda = 632,8$ нм и

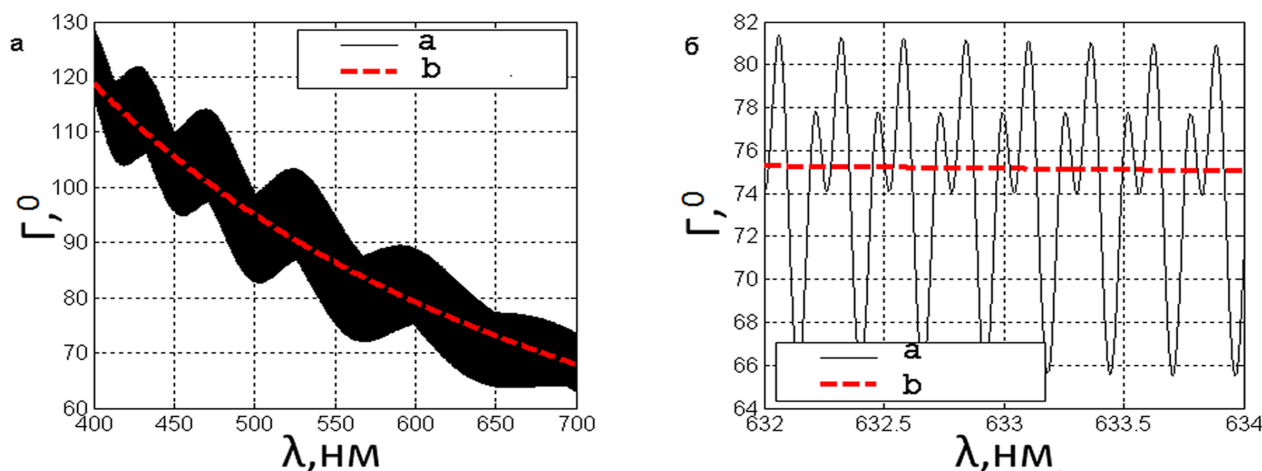


Рис. 2. а) Фазовый сдвиг ячейки в широком спектральном диапазоне, рассчитанный с учетом интерференции многократных отражений во всей многослойной структуре ЖК ячейки (а) и без учета (b) во всем видимом диапазоне, б) фазовый сдвиг ячейки в узком спектральном диапазоне (толщина стеклянных подложек 500 мкм, толщина электродов 20 нм, толщина полимера 200 нм, толщина слоя ЖК 1 мкм.)

мощностью $P=35$ мВт. Для изменения азимута входной линейной поляризации использовалась четвертьволновая пластинка и призма Глана с коэффициентом экстинкции 10^{-5} . Аналогичная призма Глана в подвижной оправке использовалась для анализа состояния поляризации на выходе системы. Сигнал на выходе из системы регистрировался фотодиодом PDA100A, подключенным к осциллографу. Исследуемая система состояла из электрически управляемого фазосдвигающего элемента – ЖК ячейки и составной четвертьволновой пластинки. Угол между осями ЖК ячейки и составной четвертьволновой пластинки φ составлял 45° . Азимут линейной поляризации на входе системы изменялся с шагом 15° . На выходе системы регистрировалась минимальная и максимальная интенсивность сигнала при вращении анализатора и определялась эллиптичность излучения. В результате проведенных экспериментальных исследований показано, что эллиптичность излучения на выходе системы определяется значением азимута входной линейной поляризации и не зависит от фазового сдвига активного элемента, а угол поворота эллипса поляризации равен половине этого значения (рис. 3). При исследовании свойств четвертьволновой двухкомпонентной системы для преобразования состояния поляризации высококогерентного излучения в качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазер с блоком контроля температуры и две системы из слюдяных пластин разной толщины. С помощью охлаждающего устройства с некоторым шагом изменялась температура рабочего вещества лазера в диапазоне от 10 до 30° и, соответственно, длина волны излучения, а система каждый раз настраивалась на преобразование циркулярно поляризованного излучения из исходного линейно поляризованного. Для измерения длины волны использовался монохроматор с ценой деления 0,1 нм. Таким образом, каждой длине волны излучения можно

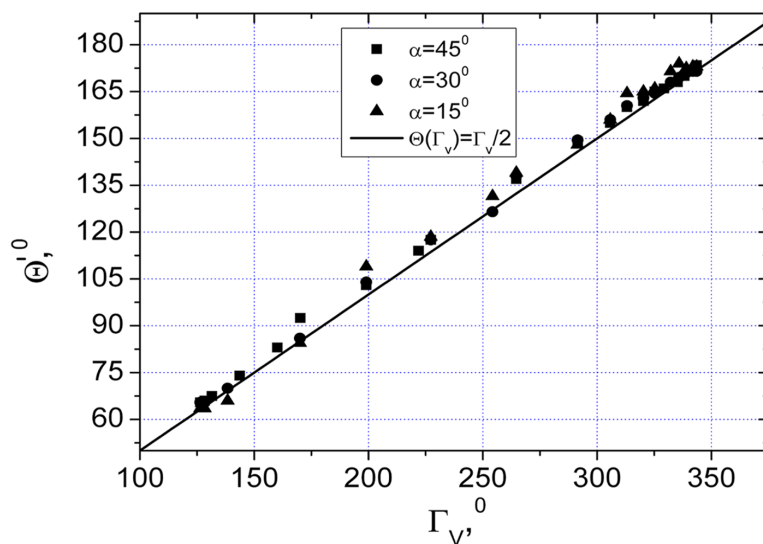


Рис. 3. Теоретическая зависимость, полученная из выражения 5(сплошная кривая), и экспериментальные значения угла поворота большой оси эллипса поляризации Θ' от фазового сдвига активного элемента Γ_V .

поставить в соответствие значение угла φ системы (точность измерения угла составляла $\pm 0,5^\circ$). Спектральная зависимость угла φ составной четвертьвольновой пластины представлена на рис. 4.

Показано, что полученные результаты можно использовать для создания поляризационного метода измерения сдвига длины волны излучения, а с помощью исследованной системы можно оценить изменение длины волны излучения в диапазоне 3,5 нм с точностью 0,2 нм, и точность измерений в выбранном спектральном диапазоне можно повышать изменением толщин отдельных элементов. Для измерения фазового сдвига нематической жидкокристалличе-

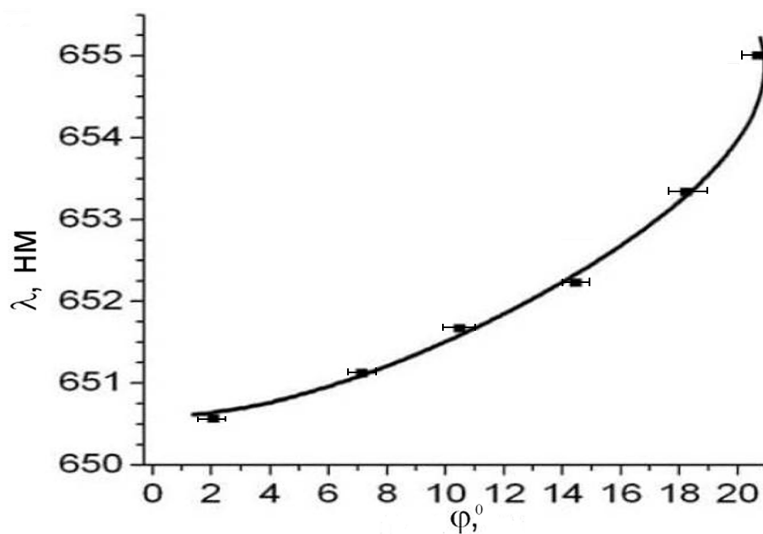


Рис. 4. Экспериментальная зависимость длины волны когерентного излучения от угла настройки одной из исследованных четвертьволновых систем, толщины пластин которой $d_1 = d_2 = 15$ мкм.

ской ячейки был выбран метод, который обладает высокой точностью и позволяет оценить влияние интерференции многократных переотражений на ее свойства. Для экспериментальных исследований "нуль-эллипсометрический" метод с оптимизированным фазовым сдвигом компенсатора [16*] был адаптирован для измерения фазового сдвига ЖК модулятора в узком спектральном диапазоне. Азимут линейной поляризации на входе системы α , состоящей из ЖК ячейки, слюдяной пластинки-компенсатора и анализатора, изменялся с некоторым шагом, затем измерялись два различных значения углов компенсатора $\Theta_{1,2}$, при которых на выходе системе наблюдалось гашение сигнала. Для определения фазового сдвига ЖК модулятора методом подгонки по двум параметрам использовалась разность углов $\Theta_1 - \Theta_2$, соответствующий азимут входной линейной поляризации α и измеренное ранее значение фазового сдвига компенсатора Γ_c для каждой длины волны излучения. Зависимость фазового сдвига ячейки от длины волны излучения была получена экспериментально, и проведены теоретические оценки зависимости, полученные с учетом реальных параметров используемой в эксперименте ячейки. На основе сравнительного анализа теоретических расчетов и экспериментальных данных показано, что интерференция многократных переотражений наблюдается только на внутренних слоях модулятора и оказывает существенное влияние на его фазовый сдвиг (рис. 5).

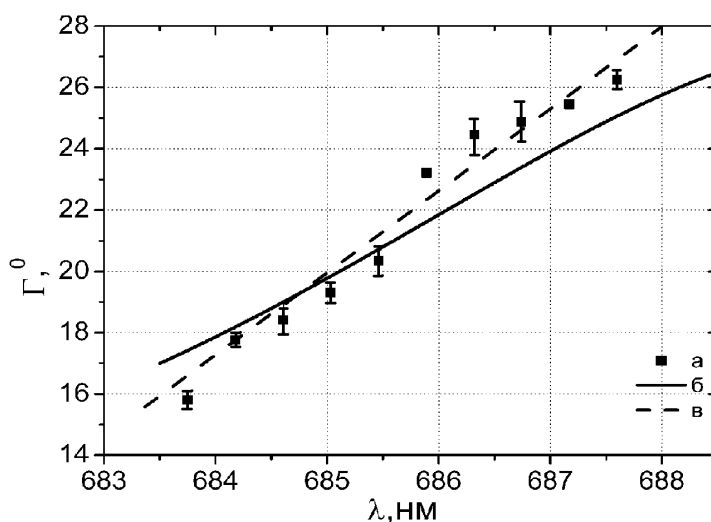


Рис. 5. а) Экспериментальная зависимость фазового сдвига от длины волны излучения. б) Теоретическая зависимость фазового сдвига от длины волны излучения с учетом интерференции только на внутренних слоях модулятора (толщина зазора ячейки составила 6 мкм, двулучепреломление ЖК на длине волны излучения $\lambda = 589.3 \text{ нм} - 0.0921$, толщина ИТО – 0.05 мкм; толщина полимерного слоя – 250 мкм, в) аппроксимация данных линейной функцией

В заключении сформулированы основные результаты работы.

I. Определены закономерности преобразования состояния поляризации двухкомпонентными системами из элементов с фиксированными и переменными фазовыми сдвигами:

а) Получены аналитические зависимости эффективного фазового сдвига, положения эффективных осей и оптической активности системы, состоящей из активного и пассивного фазосдвигающих элемента, от их параметров и угла между их оптическими осями.

б) Получены выражения, позволяющие определить состояние поляризации на выходе системы, состоящей из активного и пассивного фазосдвигающих элементов, в зависимости от состояния поляризации на входе, фазовых сдвигов составляющих элементов и угла между их оптическими осями.

в) Показано, что для получения любого состояния поляризации из линейно поляризованного излучения в системе, состоящей из активного и пассивного фазосдвигающих элементов, достаточно двух степеней свободы, а именно, фазового сдвига активного элемента и азимута линейно поляризованного излучения на выходе.

д) Теоретически и экспериментально показано, что систему, состоящую из активного фазосдвигающего элемента и пассивного элемента с фазовым сдвигом 90 градусов, оптические оси которых составляют угол 45 градусов друг с другом, можно использовать как аналог четвертьволновой пластинки с управляемой оптической активностью. Продемонстрировано, что эллиптичность излучения на выходе такой системы определяется только азимутом линейной поляризации, а поворот эллипса поляризации - фазовым сдвигом активного элемента, причем составляет половину его значения.

е) Теоретически доказано, что любое эллиптически поляризованное излучение на выходе аналога четвертьволновой системы с управляемой оптической активностью можно преобразовать в линейно поляризованное с заданным азимутом, но чем выше значение эллиптичности на входе системы, тем меньше диапазон возможных значений эллиптичности, которые могут быть получены на выходе системы.

Совмещение двух способов управления параметрами сложных поляризационных систем, одновременное изменение фазового сдвига одной из пластин и изменение угла между их осями позволяет уменьшить количество элементов, необходимых для преобразования одного состояния поляризации в другое.

II. Исследовано распространение высококогерентного излучения через сложные поляризационные системы:

1) составные четвертьволновые системы

а) Определены закономерности преобразования состояния поляризации высококогерентного излучения в двухкомпонентной четвертьволновой пластине. Показано, что зависимость угла настройки от длины волны излучения имеет быстро осциллирующий характер; амплитуда и период осцилляций определяются толщинами пластин и длиной волны излучения, а различие между углами настройки в системе из пластин слюды для получения циркулярно поляризованного излучения с разными знаками может достигать 12 градусов.

б) Предложен поляризационный метод измерения длины волны некогерентного излучения в широком диапазоне длин волн и измерения сдвига длины волны когерентного излучения в узком спектральном диапазоне, но с большей точностью. Показано, что точность в выбранном спектральном диапазоне можно варьировать, изменяя толщины пластин.

в) Создана экспериментальная установка для измерения параметра настройки четвертьволновой системы от длины волны излучения и продемонстрировано, что четвертьволновую систему из пластин слюды можно использовать для измерения сдвига длины волны когерентного излучения в диапазоне длин волн 3,5 нм с точностью 0,2 нм.

2) жидкокристаллические модуляторы

а) Предложен метод расчета фазового сдвига анизотропной слоистой структуры жидкокристаллического модулятора на основе уравнений Максвелла.

б) Определен вклад различных слоев жидкокристаллического модулятора в зависимость его фазового сдвига от длины волны когерентного излучения.

в) Отработана методика изготовления и тестирования жидкокристаллических ячеек на основе сегнетоэлектрических и нематических жидких кристаллов с толщиной зазора между подложками 2-20 мкм.

г) Нуль-эллипсометрический метод с оптимизированным фазовым сдвигом компенсатора адаптирован для измерения зависимости фазового сдвига жидкокристаллического модулятора от длины волны когерентного излучения.

д) Проведен сравнительный анализ экспериментальных данных с теоретическим расчетом зависимости фазового сдвига жидкокристаллического модулятора от длины волны когерентного излучения для различных моделей его структуры.

Экспериментально выявлена основная роль переотражений на внутренних слоях модулятора на спектральную зависимость его фазового сдвига. Полученные результаты позволили выявить роль многолучевой интерференции в преобразовании состояния поляризации излучения сложными составными системами в широком спектральном диапазоне.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1*. Cense B. et. al. In vivo depth-resolved birefringence measurements of the human retinal nerve fiber layer by polarization-sensitive optical coherence tomography // Proceedings of the SPIE.– 2003.– Vol. 4956.– P. 73.

2*. Efron U. Technology and applications of spatial light modulators // Optical Engineering.– 2006.– 45– P. 991.

3*. Waddy D.S., Chen L., Bao X. Polarization effects in aerial fibers // Optical Fiber Technology.– 2005.– Vol. 11, No. 1.– P. 1.

4*. Savenkov S. N., Sydoruk Ol. I., Muttiah R. S. Eigenanalysis of dichroic, birefringent, and degenerate polarization elements: a Jones-calculus study // Applied

- Optics.– 2007. – Vol. 46, No 27.– P. 6700.
- 5*. Vogel W., Berroth M. Tuneable liquid crystals Fabry-Perot filters // Proceedings SPIE.– 2002.– Vol. 4944.– P. 293.
- 6*. Goltser I.V., Darsht M.Ya., Kundikova N.D., Zel'dovich B.Ya. An adjustable quarter-wave plate // Optics Communications.– 1993.– Vol. 97.– P. 291.
- 7*. Darsht M.Ya., Goltser I.V., Kundikova N.D., Zel'dovich B.Ya. An adjustable half-wave plate // Applied Optics.– 1995 – Vol. 34– P. 3658.
- 8*. Clarke D. Interference effects in Pancharatnam wave plates // Journal of optics A: Pure and Applied Optics.– 2004.– Vol. 6.– P. 1041.
- 9*. Кундикова Н.Д., Рогачева Л.Ф., Чирков В.В. Составная перестраиваемая фазовая пластина без оптической активности // Известия Челябинского научного центра.–2001.– Vol 1.– P. 17.
- 10*. Chirkov V.V. et. al. Application of the conversion research results for international cooperation // Proceedings of III International Symposium.–1999–Vol 1.– P. 25.
- 11*. Stockley J.E. et. al., Johnson K. M. High-speed analog achromatic intensity modulator //Optics Letters.– 1994– Vol. 19.–P. 10.
- 12*. Zhuang Z., Suh S.-W., Patel JS. Polarization controller using nematic liquid crystals //Optics Letters.– 1999.– Vol. 10– P. 694.
- 13*. Kushnir O.S. Effect of multiple reflections of light on the optical characteristics of crystals // Pure Appl. Opt.– 2003. Vol. 5, – P. 478.
- 14*. Berreman D.W. Optics in Stratified and Anisotropic Media: 4X4-Matrix Formulation // J. Opt. Soc. Amer.– 1972.– Vol.62.– P. 502.
- 15*. Kliger D. Polarized light in optics and spectroscopy.–L: Academic Press,1990.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

1. Kundikova N., **Lonshakova A.** Wavelength measurement by polarization method // Proceedings of SPIE/ICO20: Optical Dev.and Instr.–2005 .–Vol. 6024, P. 80-87.
2. Кундикова Н.Д., **Лонцакова А.М.** Поляризационный датчик длины волны когерентного излучения // Труды четвертой международной конференции молодых ученых и специалистов.- СПб: Изд. СПбГУ ИТМО 2005,– стр.297.
3. Bibikova E.A., Chernyaev I.V., Kundikova N.D., Rogacheva L.F., **Suvorova A.M.** An Adjustable Retardation Mixed System Consisted of Plates with Constant and Variable Phase Shifts // Proceedings of the ICO Topical Meeting on Optoinformatics / Information Photonics'2006,– с.503-504.
4. **Suvorova A.**, Chernyaev I., Haase W., Kundikova N., Pozhidaev E., Podgornov F. Light polarization modulation with Ferroelectric liquid crystals. // Integrated Ferroelectrics– 2007– Vol. 87, P. 3-12.

5. Chernyaev I., **Suворova A.**, Podgornov F., Haase W. Influence of the Multiple Beam Interference on Phase Retardation of Liquid Crystal Cells // Mol. Cryst. Liq. Cryst.– 2008– Vol. 488, P. 219-230.

6. **Суворова А.М.**, Попков И.И. Составная четвертьволновая система с перестраиваемой оптической активностью // Труды шестого Самарского регионального конкурса студентов и молодых исследователей по оптике и лазерной физике – М: РИИС ФИАН, 2008.– с.7-13.

7. Кундикова Н.Д., **Суворова А.М.** Перестраиваемая четвертьволновая пластинка для определения длины волны оптического излучения // Письма ЖТФ, 2009.– т.35.– No.2.– с.21-28.