

УДК 535.44.621

## МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА СТРУКТУРНОГО ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ВЕЩЕСТВ

(Обзор)

© Я.А. Фофанов

*Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург*

Поступила в редакцию 10 июня 1999 г.

Обзор посвящен проблеме развития и применения методов исследований структурного двулучепреломления (ДЛП) прозрачных материалов и веществ. Описан разработанный в ИАП РАН поляризационно-оптический анализатор (ПОА), реализующий развитые методы. Представлены результаты исследований с помощью ПОА характеристик прецизионных элементов поляризационной оптики и образцов совершенных оптических кристаллов. Показаны перспективы дальнейшего развития рассматриваемых методов.

### ВВЕДЕНИЕ

Поляризованный свет используется в научных исследованиях очень широко. Обладая высокой чувствительностью, поляризационные методы позволяют регистрировать малые изменения оптических свойств, происходящие в изучаемых объектах по разным причинам [1-4]. Класс исследуемых процессов и объектов весьма велик: различные вещества и материалы (стекла, кристаллы, полимеры и др.), обладающие собственной или наведенной оптической анизотропией, границы раздела и т.д. [2-10]. Измерение оптического двулучепреломления (ДЛП) является одним из способов технологического контроля при создании оптических, оптоэлектронных, голографических, и др. материалов и элементов [5, 11-13]. В связи с развитием оптического и лазерного приборостроения в последние годы становится особенно актуальной проблема измерений и исследований малого (единицы градусов и менее) ДЛП. В то же время, чувствительность, обычно используемых для этих целей традиционных методик и серийно выпускаемых приборов, оказывается в ряде случаев уже явно недостаточной, что определяет необходимость развития соответствующих методов измерений и создания аппаратно-инструментальных средств [12, 13].

### 1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ИЗМЕРЕНИЙ С МОДУЛЯЦИЕЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Как правило, поляризационные методы исследований имеют более высокую чувствительность, если состояние поляризации пробного излучения промодулировано во времени [3, 7, 14]. Принцип измерений с модуляцией поляризации нетрудно понять из схемы, которая изображена в верхней части рис. 1. Излучение лазера L проходит через

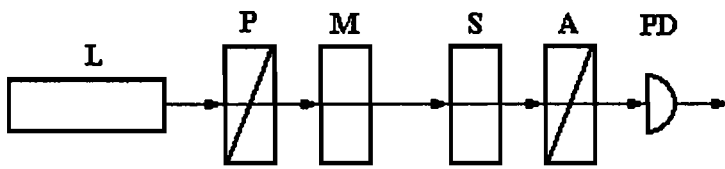
поляризатор P, модулятор M, зондируемый образец S, и детектируется фотоприемником PD, перед которым установлен анализатор A. На том же рисунке показана ориентация осей оптических элементов. Если потери в схеме отсутствуют, то интенсивность излучения, падающего на фотоприемник, может быть представлена в следующем виде:

$$I(t) = (I/2)[1 + \cos \beta(t)], \quad (1)$$

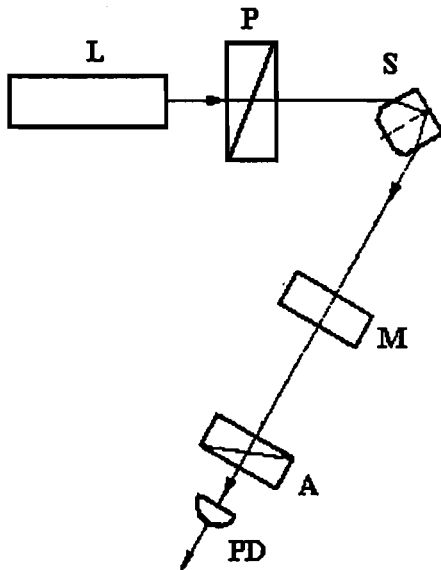
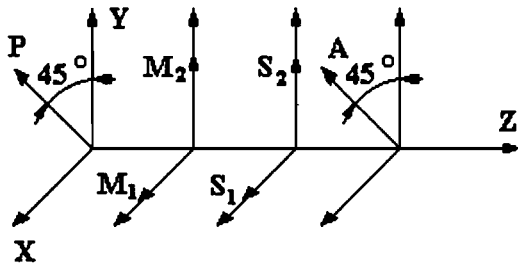
где  $I$  – интенсивность излучения после поляризатора, а  $\beta(t) = \beta_x(t) - \beta_y(t)$  – приобретаемая в процессе прохода от поляризатора к анализатору разность фаз компонент излучения, линейно поляризованных по осям  $x$  и  $y$ . Учитывая, что для указанной на рис. 1 ориентации элементов M и S величину  $\beta(t)$  можно представить в виде суммы двух слагаемых:  $\beta(t) = \Delta + A_0 \sin(\Omega t)$ , из (1) нетрудно получить формулу, связывающую измеряемое ДЛП с модуляцией интенсивности (фототока) на нечетных гармониках  $\Omega$ :

$$\sin \Delta = -\{[1 + J_0(A_0)]/2 J_k(A_0)\} I_{k\Omega} / I, \quad (2)$$

где  $\Delta$  – постоянная разность фаз (ДЛП), вносимая образцом;  $A_0$  и  $\Omega$  – соответственно, амплитуда и частота модуляции разности фаз, вносимой модулятором;  $I_{k\Omega}$  – переменная составляющая  $I(t)$  на частотах  $k\Omega$  ( $k = 1, 3, \dots$ );  $J_k(A_0)$  – функции Бесселя. Таким образом, при известном  $A_0$  величина  $\Delta$  может быть определена с помощью формулы (2) по коэффициентам модуляции фототока  $m_{k\Omega} = I_{k\Omega} / I$  на одной из частот  $k\Omega$ . Если же величина  $A_0$  неизвестна, но постоянна, то  $\Delta$  может быть определена сравнением с калиброванным образцом.



Зондирование "на проход"



Наклонное зондирование

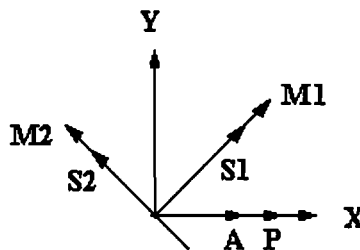


Рис. 1. Оптические схемы измерений с модуляцией поляризации. Пояснения в тексте

## 2. ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР

Основное преимущество поляризационной модуляции по сравнению с использованием поляризованных световых потоков постоянной интенсивности состоит в переносе наблюдаемых сигналов в удобные участки спектра с наименьшими шумами, где можно применять хорошо развитые методы обработки слабых переменных сигналов. Модуляция поляризации обеспечивает также в ряде случаев преимущества по сравнению с использованием вращающихся элементов: в измерительной установке отсутствуют движущиеся части, частота модуляции может быть выбрана достаточно высокой. Все это определяет широкое применение модуляции поляризации в поляриметрических исследованиях и поляризационной спектроскопии, в измерениях состояния и степени поляризации света, линейного и кругового дихроизма и т.д. [6, 9, 15-19].

Свет с модулированной поляризацией используется для зондирования различных поверхностных структур [7, 20]. Вместе с тем, в ряде случаев наличие поверхностных эффектов делает существующие поляризационно - модуляционные методы исследований либо мало эффективными, либо вообще неприменимыми. Это относится прежде всего к изучению оптических характеристик, определяемых внутренними свойствами исследуемых объектов, а не границами раздела. Одной из таких характеристик является малое внутреннее ДЛП. Его количественное определение открывает перспективы изучения трудно наблюдаемых альтернативными методами структурных особенностей, которые характеризуют во многих случаях качество используемых в высокоточных оптических и лазерных приборах кристаллов и стекол, элементов поляризационной оптики и т. д. [5, 11-13].

Для решения указанных выше и других аналогичных исследовательских задач в ИАНП РАН разработан лазерный поляризационно-оптический анализатор (ПОА), который позволяет реализовать оригинальную методику измерений, называемую "наклонным зондированием". Её основная особенность заключается в оригинальном сочетании модуляции состояния поляризации с зондированием исследуемых образцов линейно поляризованным излучением [21]. Для получения более полной информации о характере ДЛП исследуемых образцов ПОА допускает применение традиционной методики (зондирование "на проход"), в которую внесён ряд усовершенствований.

Блок-схема оптической части ПОА, предназначенной для исследований "на проход", практически совпадает с изображенной на рис. 1. Там же показана одна из блок-схем, используемых

для наклонного зондирования. Плоскость поляризации зондирующего излучения расположена горизонтально. Угол падения излучения на поверхности образца устанавливается равным углу Брюстера, что делает вклад поверхностных поляризационных эффектов минимальным. Далее излучение проходит через модулятор, анализатор и падает на фотоприемник. Анализ формирования сигнала в схемах на рис. 1 дает в случае произвольно ориентированных образцов с малым  $\Delta$  следующую формулу [21]:

$$\Delta \cos 2\Psi = -\{[1 + J_0(A)]/2 J_k(A_0)\} m_{k\Omega}, \quad (3)$$

где  $\Psi$  – угол, определяющий ориентацию главных осей образца. Если угол  $\Psi$  остается постоянным при движении вдоль луча внутри образца, то в соответствии с соотношением (3) ПОА измеряет величину  $\varphi = \Delta \cos 2\Psi$ . В общем случае эллипсоид диэлектрической проницаемости может иметь различную ориентацию в различных точках внутри исследуемого образца, так что измеряемую величину  $\varphi$  следует понимать как характеристику ДЛП образца, усредненную вдоль траектории зондирования.

В качестве источника излучения в ПОА используется He-Ne лазер ( $\lambda = 0,63$  мкм) с пониженным уровнем шумов излучения [22]. Для регистрации переменных сигналов используются синхронные детекторы, которые через интерфейс связаны с компьютером. Сигналы с датчиков положения исследуемых образцов также поступают в компьютер. Относительная погрешность измерений для  $\varphi \sim 30'$ , определяемая, главным образом, дрейфом нулевой линии, составляет не более 10%. О пороговой чувствительности и разрешающей способности см. далее раздел 4.

## 3. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОА В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Возможности применений разработанного в ИАНП РАН поляризационно-оптического анализатора для научных исследований были продемонстрированы в процессе изучения поляризационных характеристик образцов кристаллов высокого оптического качества и оптических элементов. Одними из исследуемых оптических элементов являлись прецизионные призмы ПВО, изготовленные из плавленого кварца и применяемые в кольцевых резонаторах лазерных гироскопов. Выбор в качестве исследуемых объектов лазерных призм ПВО обусловлен тем, что их ДЛП определяет анизотропию резонаторов и, следовательно, чувствительность гироскопов к внешним магнитным полям, которая ограничивает их точность [23].

На первом этапе призмы были исследованы "на проход", когда промодулированное по состоянию поляризации излучение проходило через них, не испытывая полного внутреннего отражения. Это дало возможность получить более полную информацию о характере ДЛП исследуемых призм. На втором, основном, этапе поляризационные характеристики призм были подробно исследованы методом наклонного зондирования. В этом случае линейно поляризованное излучение, падающее на призму, испытывало полное внутреннее отражение на одной из граней, что приводило к повороту его волнового вектора.

Исследования показали, что закрепление призм на основании с помощью оптического контакта приводит к формированию характерной структуры ДЛП: вблизи основания его величина составляет около  $2^\circ$ , далее оно быстро уменьшается, меняет знак, затем наблюдаются один - два пологих максимума величиной не более  $0,3^\circ$  [24]. В призмах, закрепленных с помощью пайки индием, ДЛП имеет аналогичное структурное распределение, однако его величина вблизи основания составляет около  $0,5^\circ$ . Для большинства призм, снятых с контакта или вообще не подвергавшихся каким-либо воздействиям, ход кривых плавный, ДЛП в средней части призм составляет не более  $10$  угл. мин. Воспроизводимость результатов измерений на ПОА позволила также обнаружить в некоторых из закрепленных призм медленное (в течение полугода) изменение структуры ДЛП.

С целью обоснования разработанных методик исследований и интерпретации полученных результатов выполнен теоретический анализ наблюдавшегося в призмах ДЛП. Анализ проведен на основе двух моделей — плоской и цилиндрической, для каждой из которых найден тензор напряжений, определены коэффициенты уравнения оптической индикатрисы и решена задача о переносе излучения. Результаты численных расчетов дают надежное качественное и вполне удовлетворительное, учитывая простоту моделей, количественное соответствие с экспериментально наблюдавшимися зависимостями как для наклонного зондирования, так и при зондировании "на проход". Указанное соответствие сохраняется при изменении параметров моделей в широких пределах, что говорит об их прочности [24].

Из оптических кристаллов в качестве объекта исследований был выбран флюорит [25]. Оптические кристаллы флюорита ( $\text{CaF}_2$ ) обладают высокой прозрачностью в широкой области спектра (от ВУФ до ИК). Возрастающий интерес к высокочувствительным поляризационно-оптическим исследованиям флюорита обусловлен, главным образом, тем, что в последнее время кристаллы фтористого кальция нашли широкое применение

при изготовлении линз объективов для фотолитографии. Подобные применения повышают требования к структурной и оптической однородности материалов, что заставляет разрабатывать методы количественного анализа характеризующего однородность остаточного ДЛП, имеющего весьма малые величины. Исследуемый образец представлял собой уникальный по качеству кристалл флюорита размерами  $23 \times 22 \times 11$  мм с двумя плоскопараллельными гранями, полученный из экспериментальных серий в результате длительной селекции по однородности и другим характеристикам. Изучение подобных уникальных образцов показывает реальные перспективы создания современных материалов высокого оптического качества.

Сканирующее просвечивание исследуемого образца на поляризационно-оптическом анализаторе показало, что ДЛП в нем обладает характерной микронеоднородностью величиной около  $10$  угл. мин. и менее, связанной, по-видимому, с микронапряжениями. Пичковая знакопеременная структура ДЛП выявляет особенности внутриростовых и послеростовых процессов, определяющих качество получаемых кристаллов. Исследования на ПОА были дополнены определением кристаллографической ориентации просвечиваемой плоскости и наблюдением поляризационно-оптических картин, для чего был использован усовершенствованный поляриметр. Сопоставление всех полученных данных выявило количественные характеристики наблюдаемого ДЛП и его характерное пространственное распределение (структуру), ориентация которой соотносена с кристаллографической системой координат [25].

Описанные исследования демонстрируют, таким образом, возможности определения с помощью поляризационно-оптического анализатора малого структурного ДЛП квазисовершенных оптических кристаллов. Появляется также уникальная возможность количественного сравнения получаемых результатов с данными для других кристаллов и для просвечивания вдоль других кристаллографических направлений [25, 26].

#### **4. ПОРОГОВАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МЕТОДА МОДУЛЯЦИИ ПОЛЯРИЗАЦИИ, ЕГО МОДИФИКАЦИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**

Рассмотренные выше схемы с глубокой поляризационной модуляцией обладают, к сожалению, рядом недостатков. Они не определяют ориентацию главных осей исследуемых образцов, на фотоприемник поступает только часть фотонов зондирующего излучения, не всегда происходит достаточно полное снижение шумов измерений. Все это в целом приводит к ухудшению чувствительности и разрешающей способности, потере части

информации об исследуемых объектах. Теряются преимущества, которые может дать применение неклассического (сжатого) света [27, 28].

Указанные недостатки в значительной степени исключаются в модифицированных схемах. Два основных варианта модификации основаны на использовании дифференциальной и параллельной методик регистрации. Первый вариант имеет целью увеличение чувствительности за счет подавления избыточных флуктуаций зондирующего излучения, второй — получение более полной информации об исследуемых объектах. Вторая схема содержит два канала, которые организуются с помощью поляризационно-независимого делителя и двух анализаторов. Параллельная аналоговая обработка фотосигналов обоих каналов и их совместный цифровой анализ дают возможность одновременного определения  $\Delta$  и  $\Psi$  в каждой точке в процессе сканирования при произвольной ориентации осей исследуемого образца.

В дифференциальной схеме вместо анализатора используется поляризационный делитель, который разделяет излучение на два пучка с взаимно ортогональными линейными поляризациями [29,30]. Сигналы с двух регистрирующих излучение фотодиодов поступают в дифференциальный усилитель. На основании проведенного анализа найдены такие взаимные ориентации осей оптических элементов, при которых подавление избыточных шумов является наибольшим. Важной особенностью найденных конфигураций является отсутствие в спектрах фототоков сильных неинформативных компонент, обусловленных модуляцией поляризации. В одной из таких конфигураций — модифицированной конфигурации III — достигнуто значительное (в девять раз) подавление флуктуаций интенсивности зондирующего излучения по сравнению с предельно несимметричным наблюдением [31, 32]. Здесь следует отметить, что применение лазеров с пониженным уровнем технических флуктуаций [22] обеспечивает достаточную для многих задач чувствительность при несимметричном (одноканальном) зондировании [33].

Одним из основных физических факторов, которые ограничивают чувствительность поляризационно-оптических измерений, являются шумы зондирующего излучения [4, 27, 29]. Величина предельно малого ДЛП, обнаружимого на уровне фотонных (дробовых) шумов света (пороговая чувствительность), определяется следующим соотношением [31]:

$$\varphi_{\min} = 1,7[(hc/\eta\lambda I_0)\Delta\nu]^{1/2}, \quad (4)$$

где параметр  $\eta$  учитывает суммарные потери в оптическом тракте, включая квантовый выход фотодетекторов,  $\Delta\nu$  — полоса системы регистрации.

Например, для мощности лазера 1 мВт,  $\lambda = 0,63$  мкм,  $\eta = 0,3$ ,  $\Delta\nu = 1$  Гц из формулы (4) получаем  $\varphi_{\min} = 1,5 \cdot 10^{-4}$  угл. мин. Подавление избыточных флуктуаций позволило достичь чувствительности на уровне пороговых значений в модифицированной конфигурации III. Это оказалось возможным при исследованиях нестационарных объектов, малое ДЛП которых меняется медленно по сравнению с периодом модуляции поляризации и, в то же время, достаточно быстро, чтобы выйти из области нулевых частот [32].

Соотношение (4) справедливо и в режиме сканирования, если изменения  $\varphi$  происходят достаточно медленно по сравнению с временем накопления сигнала. Другими словами, характерная пространственная частота наблюдаемого рельефа ДЛП, скорость сканирования и полоса системы регистрации должны быть согласованы так, чтобы полезные сигналы не были потеряны. Существующая взаимосвязь между  $\varphi_{\min}$  и пространственно-временными параметрами режима сканирования указывает на то, что величина  $\varphi_{\min}$  не полностью характеризует чувствительность и разрешающую способность в рассматриваемом случае. Это послужило основанием для формулировки критерия, предназначенного для более последовательной оценки пороговой чувствительности и разрешающей способности поляризационных измерений [31]. Критерий использует объем  $\Delta\Phi = \Delta\varphi_1 \cdot \Delta\varphi_2 \cdot \Delta\varphi_3 \cdot \Delta\varphi_4$  предельно малого обнаружимого элемента конфигурационного пространства ( $\Phi$ -пространства) с координатами:  $\varphi_1 = \varphi^2$ ;  $\varphi_2 = x$ ;  $\varphi_3 = y$ ;  $\varphi_4 = t$ , где  $x, y$  — координаты в поперечном сечении исследуемого объекта,  $t$  — время измерений. Приращение  $\Delta\varphi_4 = \Delta t$  определяется полосой пропускания  $\Delta\Omega$  системы регистрации:  $\Delta t = \Delta\Omega^{-1}$ .

Введенный критерий дает возможность сравнивать различные режимы наблюдения при освещении измерительных схем источниками света с разными статистическими характеристиками. Рассмотрим панорамное наблюдение, при котором пробное излучение распределяется по всей площади  $S$  поперечного сечения исследуемого объекта, а фотоны собираются с малых участков площадью  $\Delta S = \Delta\varphi_2 \cdot \Delta\varphi_3$ , например, с помощью фотодиодных матриц. Если разностные фототоки элементов матриц обрабатывать параллельно, то может быть получено распределение  $\varphi$  по всему поперечному сечению объекта для данного момента времени (панорама). В этом случае объемы предельно малых обнаружимых элементов  $\Phi$ -пространства, которые могут наблюдаться одновременно при когерентном освещении (coherent panorama — CP), определяются соотношением

$$\Delta\Phi^{(CP)}_{\min} = CS / I_0 \quad (5)$$

где  $C = h\omega / 2\eta$ .

Из соотношения (5) хорошо видно более полное описание чувствительности и разрешающей способности поляризационных измерений величиной  $\Delta\Phi_{\min}$  по сравнению с  $\Delta\varphi_{\min}$ . Например, для получения лучшего пространственного разрешения следует применить другую фотодиодную матрицу или изменить фокусировку пробного излучения, так чтобы параметры  $\Delta\varphi_2$  и  $\Delta\varphi_3$  уменьшились. Если при этом необходимо сохранить то же разрешение по координате  $\varphi_1$ , то следует увеличить  $\Delta\varphi_4$ , т.е. время накопления сигнала. При панорамном наблюдении нестационарных объектов может потребоваться лучшее временное разрешение, которое можно достичь, увеличив полосу пропускания системы регистрации (уменьшив  $\Delta\varphi_4$ ). При этом, разрешение по другим координатам ухудшится. Таким образом, в зависимости от выбора условий СР-наблюдения предельно малый обнаружимый элемент может иметь различную форму в  $\Phi$ -пространстве, в то время как его объем, согласно (5), сохраняется. Разумеется, существуют дополнительные ограничения на варьирование величин  $\Delta\varphi$ . Например, из-за дифракции значения  $\Delta\varphi_2$  и  $\Delta\varphi_3$  не могут быть взяты произвольно малы. Соотношение (5) дает фундаментальные ограничения чувствительности и разрешающей способности, определяемые фотонными (дробовыми) шумами фотоприема при освещении когерентным светом.

Уменьшение шумов фотодетектирования ниже дробового уровня возможно, как известно, при использовании сжатых состояний света. Это позволяет проводить оптические измерения с чувствительностью и разрешающей способностью лучшей, чем при использовании классического (когерентного) света [27, 28]. Обычно используемый для этих целей свет является одномодовым сжатым светом [27]. В работе [28] рассмотрены перспективы применения для малошумящей обработки и передачи информации (изображений), так называемого, пространственно-многомодового сжатого света. Одна из его особенностей заключается в том, что при детектировании фотоприемниками, размер которых больше некоторой характерной величины, определяемой условиями генерации, флуктуации фототока каждого приемника лежат ниже дробового уровня. Найдены конкретные способы организации измерений с глубокой модуляцией фазы и с применением многомодового сжатого света, допускающие реализацию субдробовой чувствительности [30]. В конфигурации III для этого необходимо на вход схемы вместо поляризатора установить элемент, позволяющий смешивать

излучения двух входных источников с ортогональными направлениями линейной поляризации. При освещении такой схемы по одному входу когерентным, а по второму многомодовым сжатым светом возможны малошумящие (с шумами ниже дробовых) поляризационные измерения при наличии сильной модуляции и с разрешением в пространстве [30, 31].

Введенный критерий позволяет оценить преимущества, которые может дать неклассический свет. Одномодовый сжатый свет дает преимущества только в режиме сканирования. При панорамном наблюдении его хорошие свойства теряются, т.к. на каждый элемент матриц поступает только малая часть полного регулярного потока фотонов и шумы восстанавливаются практически до дробового уровня [28,31]. Положение радикально меняется для панорамного наблюдения в многомодовом сжатом свете (multimode ranogama – MMP). В этом случае справедливо неравенство

$$\Delta\Phi^{(MMP)}_{\min} < \Delta\Phi^{(CP)}_{\min}. \quad (6)$$

Здесь следует отметить, что величины  $\Delta\varphi_i$  не могут варьироваться, исходя только из неравенства (6). Например, если величина  $\Delta\varphi_2\Delta\varphi_3$  будет выбрана меньше площади когерентности [28], то регулярность отдельных световых потоков утратится. Тем не менее ясно, что использование многомодового сжатого света для освещения модифицированных измерительных схем с глубокой поляризационной модуляцией позволит при панорамном наблюдении обнаруживать в  $\Phi$ -пространстве элементы меньшего объема, чем при освещении когерентным светом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Борн М, Вольф Э. Основы оптики. 1973. М. Наука. 719 с.
2. Аззам З.М., Башара Т.М. Эллипсометрия и поляризованный свет. 1981. М. Мир. 583 с.
3. Запасский В.С. // ЖПС. 1982. Т. 37, вып. 2. С.181-196.
4. Александров Е.Б., Запасский В.С. Лазерная магнитная спектроскопия. 1986. М. Наука. 280 с.
5. Aben H. Photoelasticity of Glass. 1993. Springer-Verlag. 255 p.
6. Krishnan S. // J. Opt. Soc. Am. A. 1992. V. 9. P.1615-1622.
7. Acher O., Bigan E., Drevillon B. // Rev. Sci. Instrum. 1989. Vol. 60 (1). P.65-77.
8. Collins R.W. // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 61. P.2029-2062.
9. Shindo Y., Mizuno K., Sudani M., Hayakawa H., Ohmi Y., Sakayanagi N., and Takeuchi N. // Rev. Sci. Instr. 1989. V. 60, No. 12. P.32-38.

10. Грищенко А.Е., Черкасов А.Н. // УФН. 1997. Т. 167, № 3. С.269 – 285.
11. Афанасьев И.И., Ионина Н.В. // Оптика и спектр. 1989. Т. 67, Вып. 2 С.319-323.
12. Optical Materials and Laser Technology for Telecommunications. Proceedings of 4th European East-West Conference & Exhibition on Materials and Process. 1993. Research & Development Institute "Prometei". St.Petersburg. P.133-172.
13. Материалы международной конференции «Прикладная оптика-96» // Оптический журнал. 1997. № 2, 3, 8.
14. Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. Методы модуляции и сканирования света. М. Наука. 1970. 320 с.
15. Mollenauer L.F., Downie D., Engstrom H., and Grant W.B. // Appl. Opt. 1969. V. 8, No. 3. P.661-665.
16. Badoz J., Billardon M., Canit J.C., Russel M.F. // J. Optics (Paris). 1977. V. 8. No. 6. P.373-384.
17. Jensen H.P., Shellman J.A., and Troxell T. // Appl. Spectr. 1978. V. 32, No. 2. P.192-200.
18. Быстранов В.Б. и Шутов А.М. Сток-эллипсометр. // Эллипсометрия в науке и технике. Сб. Вып. 2. (Ред. Свиташев К.К. и Мардежев А. С.). 1990. Новосибирск. С.50-56.
19. Бадалян А.М., Каичев В.В., Подгорнов Е.А. // Научное приборостроение. 1997. Т. 7, № 1-2. С.86-89.
20. Jasperson S.N. Burge D.K., O'Handley R.C. // Surf. Sci. 1973. V 37. P.548.21. Индисов В.О., Курятов В.Н., Семенов Б.Н и др. // Оптика и спектр. 1993. Т. 75, В. 2. С.451-460.
22. Фофанов Я.А. // Квантовая электроника. 1989. Т. 16, № 12. С.2593-2595.
23. Электронная техника. Серия 11. Лазерная техника и оптоэлектроника. (Казаков А.А. ред.). 1991. Изд. НИИ «Полюс». Москва. Вып. 4-5. С.35-36.
24. Sokolov I.M., and Fofanov Ja.A. // J. Opt. Soc. Am. A. 1995. Vol. 12, No. 7. P.1579-1588.
25. Фофанов Я.А., Афанасьев И.И., Бороздин С.Н. // Оптический журнал. 1998. Т.60, № 9. С.22-25.
26. Афанасьев И.И., Андриянова Л.К. // ОМП. 1989. №3. С.31.
27. Walls D.F., Milburn G.J. // Quantum Optics. - Springer, 1994. 543 p.
28. Соколов И.В. // ЖЭТФ. 1991. Т. 100. С.780-790.
29. Fofanov Ya.A. // Prog. SPIE. 1991. Vol 1811. P.413-414.
30. Соколов И.В., Фофанов Я.А. // Оптика и спектр. 1993. Т. 74, вып. 4. С.764-773.
31. Фофанов Я.А. // Оптика и спектр. 1997. Т. 82, № 6. С.1004-1009.
32. Соколов И. М., Фофанов Я. А. // Оптика и спектр. 1999. Т. 86, № 5. С.833-841.
33. Fofanov Ja.A. // International Conference on "Glasses and Solid Electrolytes" Saint-Petersburg State University, 17 - 19 May, 1999. Russia. P. 53.

## METHODS AND DEVICES FOR QUANTITATIVE ANALYSIS OF STRUCTURAL BIREFRINGENCE OF MATERIALS AND SUBSTANCES (Overview)

Ja.A. Fofanov

*Institute for Analytical Instrumentation RAS, St.Petersburg*

The overview is devoted to the problem of development and application of the methods for structural birefringence investigations of transparent materials and substances. The methods based on the strong polarization modulation of probing laser radiation. The original measurement configurations allow one to rule out the surface polarization effects and to measure the small inner birefringence of investigated objects. The Polarization-Optical Analyzer (POA) that realizes the developed methods is described. POA can be used for laboratory investigations of condensed, liquid and gaseous matter and for technological control of quality of materials and elements with high optical and structural homogeneity. The efficiency of the methods has been demonstrated in the investigations of polarization characteristics of the precision elements for polarization optics and optical crystals. The prospects of further development of the methods have been considered.