

В. А. ТРОФИМОВ, В. Т. ПРОКОПЕНКО, Ю. Т. НАГИБИН, М. Е. АЛЕКСАНДРОВ

## АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ВЕКТОРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ МЕТОДОМ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ ПОЛЯРИМЕТРИИ

Представлено математическое описание взаимодействия двух когерентных световых пучков в интерференционном поляриметре. Приведена оптическая схема интерференционного поляриметра с двухчастотным лазерным источником излучения. Проведен анализ погрешности измерений азимута и эллиптичности световых волн, позволяющий минимизировать эти погрешности при разработке аппаратного обеспечения интерференционного поляриметра.

**Ключевые слова:** интерференционная поляриметрия, оптическое гетеродинамирование, эллипсометрия, азимут, эллиптичность, сигнал биений.

Одним из направлений развития техники оптических измерений является решение широкого класса задач, связанных с необходимостью контроля тонкопленочных покрытий оптических элементов, используемых в лазерных и полупроводниковых технологиях. Определение технических параметров контролируемых образцов может быть выполнено путем измерения амплитудно-фазовых значений световой волны при ее взаимодействии с исследуемым объектом. Техника поляриметрии позволяет организовать контроль качества поверхности оптических элементов на различных этапах технологического процесса их изготовления. Эффективность такого контроля определяется совершенствованием методики измерений и ее приборным обеспечением.

Современное производство предъявляет к измерительным средствам требования, выполнение которых позволяет обеспечить высокую производительность измерений с возможностью автоматизации технологического контроля.

Известные автоматические приборы, основанные на классических принципах анализа поляризации света, как правило, узкоспециализированы, громоздки и имеют целый ряд недостатков, подробно рассмотренных в работе [1]. В работе [2] представлен способ автоматической регистрации параметров поляризации с возможностью визуализации эллипса поляризации. Особенностью устройств, основанных на этом принципе, является эффективное использование высокой степени когерентности лазерного излучения, что позволяет методом оптического гетеродинамирования получить информацию об амплитудно-фазовых характеристиках световой волны.

Явления, возникающие в интерференционном поляриметре, могут рассматриваться как результат суперпозиции двух когерентных световых пучков: один из них — исследуемый — представляет собой плоскую произвольно полностью поляризованную волну, поляризация которой подлежит измерению; другой — опорный — отличается от первого частотой и амплитудно-фазовым равенством ортогональных компонент. Этот второй пучок может быть сформирован из первого посредством линейного поляризатора с азимутом  $45^\circ$  и смещения частоты.

Для исследуемого пучка можно записать

$$E_x = A_x \cos(\omega_1 t + \varphi_x); \quad E_y = A_y \cos(\omega_1 t + \varphi_y),$$

для опорного —

$$E_x = A_0 \cos(\omega_2 t + \varphi_0); \quad E_y = A_0 \cos(\omega_2 t + \varphi_0),$$

где  $A_{x,y}$  и  $\varphi_{x,y}$  — соответствующие амплитуды и начальные фазы компонент ортогонального разложения электрического вектора  $E$ ;  $\omega_1$  и  $\omega_2$  — частоты исследуемого и опорного пучков;  $A_0$  и  $\varphi_0$  — амплитуда и начальная фаза опорного светового пучка соответственно.

Пространственные условия сложения световых пучков и их частотное смещение должны соответствовать выполнению условий оптического гетеродинирования. При соблюдении указанных требований на выходе интерферометра можно наблюдать две интерференционные картины, каждая из которых является, в соответствии с принципом Френеля — Араго, результатом суперпозиции одноименных компонент ортогонального разложения электрического вектора световых волн.

Сигналы биений, возникающие при фотоэлектрической регистрации интерферограмм, определяются как

$$i_1 = n [A_x A_0 \cos (\Delta\omega t + \varphi_x - \varphi_0)];$$

$$i_2 = n [A_y A_0 \cos (\Delta\omega t + \varphi_y - \varphi_0)],$$

где  $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$ ;  $n$  — постоянный коэффициент, учитывающий параметры конкретной схемы измерений, такие как коэффициенты отражения и пропускания оптических элементов, пространственные условия гетеродинирования, квантовая эффективность фотоприемников, усиление электронных схем и т.п. [3].

Отношение сигналов биений отображает комплексную поляризационную переменную исследуемого светового пучка:

$$i_2/i_1 = A_y/A_x \exp(i\delta),$$

где  $\delta = \varphi_y - \varphi_x$ .

Необходимое смещение частоты  $\Delta\omega$  может быть осуществлено различными способами, например, таким, как в схеме с использованием интерференционного поляриметра с двухчастотным лазерным источником излучения (рис. 1).

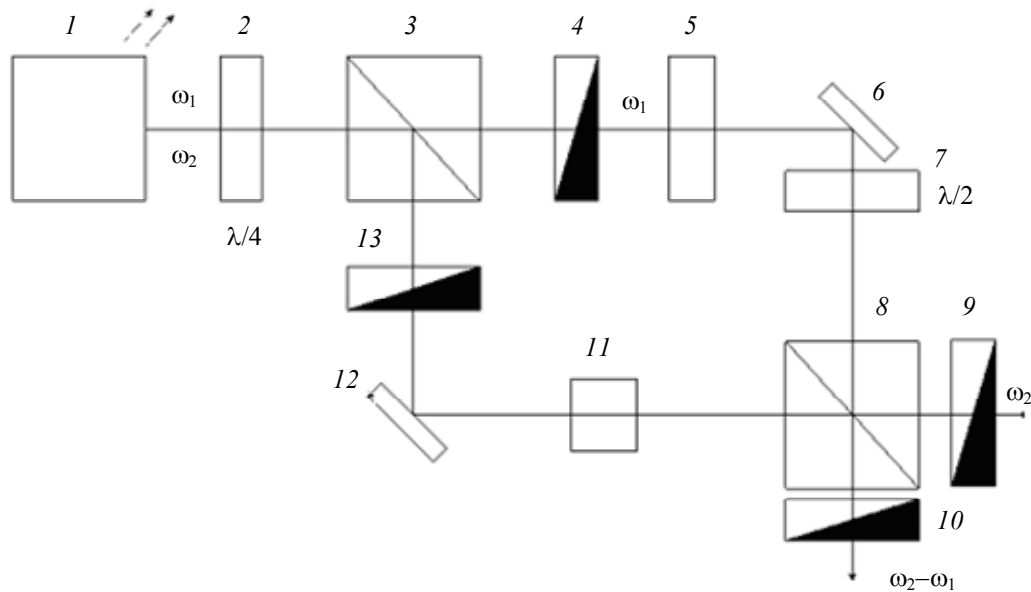


Рис. 1

В этой схеме частотное смещение обеспечивается использованием в качестве источника света двухчастотного газового лазера 1, помещенного в продольное магнитное поле. Воздействие магнитного поля на усиливающую среду проявляется в виде эффекта Зеемана, связанного с расщеплением энергетических уровней вещества активного элемента. При этом лазер одновременно может излучать две ортогональные циркулярно поляризованные электромагнитные волны с разностной частотой, пропорциональной величине приложенного магнитного поля. Четвертьволновая пластинка 2 преобразует поляризацию этих волн в две ортогональные линейные формы. После пространственного разделения пучков светоделиателем 3 каждая из линейных поляризаций фильтруется поляризаторами 4, 13, так что в каждом из плеч интерферометра, состоящего из светоделиателей 3, 8 и зеркал 6, 12, распространяется

световая волна с соответствующей зеемановскому расщеплению частотой. При этом в одно из плеч интерферометра может быть помещен исследуемый образец 11, а в другое — поляризатор 5 и полуволновая пластинка 7, обеспечивающие условия интерференции, определяемые техникой интерференционной поляриметрии. Поляризационная селекция ортогональных составляющих результирующей интенсивности света на выходе интерферометра обеспечивается поляризаторами 9, 10.

Как показано в работе [1], взаимосвязь параметров геометрического представления состояния поляризации света, в виде эллипса поляризации с азимутом  $\chi$  и эллиптичностью  $\gamma$ , с параметрами физического представления, в виде ортогональных проекций электрического вектора электромагнитного поля световой волны  $\xi = \arctg A_y/A_x$  и  $\delta = \varphi_y - \varphi_x$ , определяется уравнениями

$$\begin{aligned}\chi &= 0,5 \arctg [(\operatorname{tg} 2\xi) \cos \delta], \\ \gamma &= 0,5 \arctg [(\sin 2\xi) \sin \delta].\end{aligned}$$

Рассмотрим погрешности определения азимута  $\Delta\chi$  и эллиптичности  $\Delta\gamma$  как функции погрешностей измеряемых интерференционным поляриметром значений  $\Delta(A_y/A_x)$  и  $\Delta\delta$ . Воспользовавшись известной методикой определения погрешностей, такого рода функции можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}\Delta\chi &= \{[1+(\cos \delta \operatorname{tg} 2\xi)]^{-2} [(\cos \delta / \cos^2 2\xi) \Delta\xi]^2 + (0,5 \Delta\delta \operatorname{tg} 2\xi \sin \delta)^2\}^{1/2}, \\ \Delta\gamma &= \{(1-\sin^2 2\xi \sin^2 \delta)^{-1} [\cos^2 2\xi \sin^2 \delta \cdot \Delta\chi^2 + (0,5 \sin 2\xi \cos \delta \cdot \Delta\delta)^2]\}^{1/2}.\end{aligned}$$

Численный анализ приведенных уравнений позволяет установить изменение точности определения азимута и эллиптичности эллипса поляризации в зависимости от характера и величины систематических ошибок, присутствующих в процессе измерений. При этом можно отметить (рис. 2, а), что ошибка определения азимута  $\Delta\chi(\delta)$  остается постоянной при изменении разности фаз ортогональных компонент до значений  $\delta = 0,3\pi$  и быстро возрастает с приближением к  $\delta = 0,5\pi$  при различных значениях  $d = \Delta \operatorname{tg} \xi$ , а ошибка определения эллиптичности не зависит от изменения разности фаз. Это объясняется тем, что при циркулярной поляризации значение азимута является неопределенным.

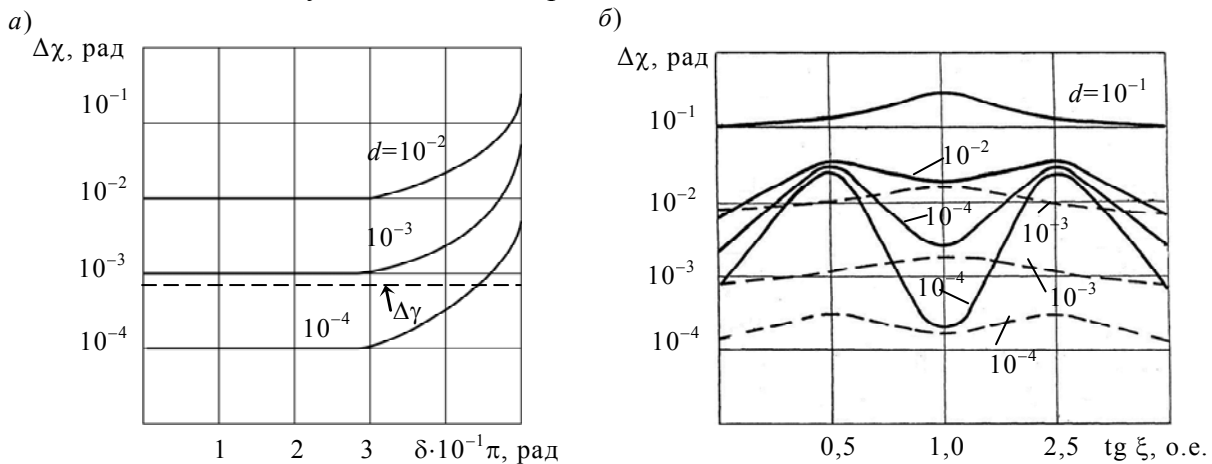


Рис. 2

Более сложную зависимость имеет погрешность определения азимута  $\Delta\chi$  как функции отношения амплитуд ортогональных компонент  $\operatorname{tg} \xi$  (рис. 2, б). Особенностью такой зависимости является присутствие ярко выраженного экстремума в области значений  $\operatorname{tg} \xi$ , близких к единице. Наличие экстремума наблюдается в измерениях, выполненных для различных значений  $d = \Delta \operatorname{tg} \xi$ . Амплитуда экстремума уменьшается с уменьшением ошибок измерения разности фаз ортогональных компонент (на рис. 2, б сплошные линии соответствуют  $\Delta\delta = 10^{-1}$ , пунктирные —  $\Delta\delta = 10^{-3}$ ).

Характер изменения погрешности определения азимута и эллиптичности как функции ошибок измерения отношения амплитуд и разности фаз ортогональных компонент показывает, что точность измерения заметно снижается, когда погрешность измерения параметров  $\Delta \text{tg } \xi$  и  $\Delta \delta$  превышает величину  $10^{-3}$ .

Выполненный анализ позволяет при разработке аппаратного обеспечения интерференционного поляриметра минимизировать систематические погрешности измерения параметров поляризации при их изменении в установленном интервале.

Компактность и универсальность прибора, возможность исследования динамики процессов с разрешением во времени, определяемым частотой сигнала биений, наглядность отображения информации в сочетании с выполненными исследованиями могут представлять интерес при измерении параметров поляризации лазерного излучения, а также при решении ряда задач юстировки сложных оптических систем, включающих анизотропные элементы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шутов А. М. Методы астрополяриметрии. М.: КомКнига, 2006. 232 с.
2. Алексеев С. А., Прокопенко В. Т., Трофимов В. А. Исследование состояния поляризации исследуемой световой волны на выходные сигналы интерференционного эллипсометра // Автотметрия. 1983. № 2. С. 65—68.
3. Васильев В. Н., Гуров И. П. Технология бесконтактного контроля объектов на основе когерентного и спектрального радаров в биомедицинских исследованиях и промышленности // Оптические и лазерные технологии: Сб. статей / Под ред. В. Н. Васильева. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2001.

#### *Сведения об авторах*

- Владимир Анатольевич Трофимов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: troftu@mail.ru
- Виктор Трофимович Прокопенко** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: prokopenko@mail.ifmo.ru
- Юрий Тихонович Нагибин** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: nagibin77@mail.ru
- Максим Евгеньевич Александров** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: max.alx@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
твердотельной оптоэлектроники

Поступила в редакцию  
14.04.11 г.