

ЭЛЛИПСОМЕТР С ВИЗУАЛИЗАЦИЕЙ ПРОЕКЦИОННОЙ КАРТИНЫ НА ЭКРАНЕ ОСЦИЛЛОГРАФА

А. Л. Дмитриев

Описываются принцип работы и экспериментальная установка эллипсометра с мгновенной индикацией проекционной картины исследуемого света на экране осциллографа. Идея реализации устройства основана на использовании явления оптического гетеродинамирования.

Классическое описание полностью поляризованного света с помощью проекционной картины, представляющей собой в общем случае эллипс, давно завоевало популярность благодаря своей простоте и наглядности. Однако определение параметров эллипса поляризации производится, как правило, косвенными методами — либо при последовательности специальных измерительных процедур [1], либо с помощью различного рода эллипсометров [2], данные на выходе которых всегда нуждаются в обработке.

Анализ типов и форм поляризации исследуемого света значительно упростится, если эллипсометр позволит фиксировать проекционную картину на индикаторном устройстве, например, на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ). При этом, кроме наглядности, обеспечиваются отсчет параметров поляризации непосредственно с экрана ЭЛТ и возможность наблюдения изменения этих параметров во времени. Подобный прибор может быть осуществлен, исходя из того факта, что изображение на экране электронно-лучевой трубки будет соответствовать проекционной картине исследуемого света, если соотношения амплитуд и фаз переменных электрических сигналов, подаваемых на ее горизонтальные и вертикальные отклоняющие пластины, будут равны тем же соотношениям для ортогональных компонент электрического вектора поляризации света. Это условие автоматически выполняется, если указанными электрическими управляющими сигналами являются сигналы биений, полученные в результате фотосмещения ортогонально поляризованных компонент светового пучка с двумя идентичными по параметрам опорными пучками со сдвинутой частотой колебаний.

Пусть I — полный вектор Джонса произвольно полностью поляризованного пучка света [3]

$$I = \begin{pmatrix} A_x e^{i\varphi_x} \\ A_y e^{i\varphi_y} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $A_{x,y}$ и $\varphi_{x,y}$ — соответственно амплитуда и начальная фаза оптических колебаний x и y — компонент поляризации. Параметры проекционной картины такого пучка полностью определяются отношением амплитуд $\beta = A_x/A_y$ и разностью фаз $\gamma = \varphi_y - \varphi_x$ колебаний. Пучком света, параметры которого идентичны для x - и y -компонент поляризации, является, по определению, линейно поляризованный под углом ($+45^\circ$) к оси координат X пучок; его вектор Джонса I_0 запишется как

$$I_0 = \begin{pmatrix} A_0 e^{i\varphi_0} \\ A_0 e^{i\varphi_0} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

даче на электроды многослойной пьезокерамической подложки зеркала переменного напряжения сети 50 или 400 гц зеркало (7) колеблется с амплитудой в несколько микрон, в результате чего осуществляется частотная модуляция отраженного им пучка света. Элемент (12) является циркулярным поляризатором и предназначен для управления интенсивностью опорного пучка света в случаях, когда исследуемый пучок не имеет круговой поляризации; при вращении элемента (12) вокруг оптической оси масштаб проекционной картины на экране ЭЛТ изменяется. Усилитель (15) играет роль усилителя горизонтального отклонения (x) сигнала на ЭЛТ, усилитель вертикального отклонения (y) является частью осциллографа (16).

Установка имела сравнительно большие габариты, так что разность хода интерферирующих перед фотоприемниками пучков света достигала 70 см и превосходила длину когерентности излучения лазера при работе его в многомодовом режиме. Поэтому лазер перестраивался на режим генерации моды TEM_{00} ($\lambda=6328 \text{ \AA}$) с мощностью излучения порядка нескольких долей милливатта. Амплитуда сигнала биений в значительной степени зависит от угла расхождения Θ гетеродинируемых пучков и теоретически (в первом приближении) коэффициент C в формулах (4), (5) пропорционален [4]

$$C \sim \frac{\sin \frac{\pi a}{\lambda} \Theta}{\frac{\pi a}{\lambda} \Theta}, \quad (6)$$

где a — размеры освещенного участка фотоповрхности. Для достижения максимального значения C следует обеспечить $\Theta \ll \lambda/\pi a$, однако, как показали измерения (рис. 2), реальная зависимость амплитуды биений от угла Θ менее критична (в наших экспериментах $a \approx 2.2 \pm 0.3$ мм и $\lambda/\pi a \approx 10^{-4}$). Режим частотной модуляции опорного пучка подбирался при изменении амплитуды U напряжения, приложенного к пьезокерамике. Оказалось, что лучшие результаты достигаются при тех значениях U , для которых амплитуда первой гармоники спектра частотно-модулированного сигнала, выражаемая функцией Бесселя 1-го рода порядка 2 [6], максимальна. При этом условии в спектре биений присутствует наименьшее количество гармоник высшего порядка, и неидентичность частотных характеристик усилителей горизонтального и вертикального отклонений луча ЭЛТ сказывается меньше всего. Так как полупрозрачные зеркала 8 и 4 имеют различные коэффициенты отражения и пропускания для x - и y -компонент поляризации, требовалась соответствующая компенсация коэффициентов усиления усилителей вертикального и горизонтального отклонения ЭЛТ; при калибровке на входе прибора с помощью пластинки $\lambda/4$ (2) устанавливалась расчетная круговая поляризация света, и на экране ЭЛТ проекционная картина настраивалась в виде круга. Дополнительный сдвиг фаз на π между колебаниями в одном из плеч балансного фотосмесителя, вносимый зеркалом 8, компенсировался при соответствующем включении клемм управляющих электродов ЭЛТ осциллографа 16. Работа на линейном участке динамической характеристики фотомножительной 13, 14 обеспечивалась регулировкой общего уровня интенсивности света с помощью диафрагмы 3.

После приведения эллисометра в рабочее состояние на его входе задавались различные виды поляризации света с помощью фазовых пластинок $\lambda/2$, $\lambda/4$ линейного поляризатора и кристаллов KDP. При этом имело место удовлетворительное совпадение параметров задаваемых и наблюдае-

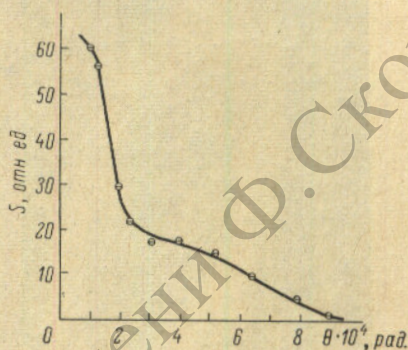


Рис. 2. Экспериментальная зависимость амплитуды S сигнала биений от углового расхождения θ гетеродинируемых пучков света (точность в определении угла $\theta \approx 1.0 \cdot 10^{-4}$ рад.).

мых на экране ЭЛТ типов и форм поляризации. Примеры фиксируемых на ЭЛТ проекционных картин света приведены на рис. 3. Точность измерения параметров поляризации составляла для отношения полуосей эллипса $\approx 10-20\%$ и для азимута $\approx 3-5^\circ$ дуги. Основным источником ошибок измерений являются некоррелированные компоненты сигналов с фотомножителей (прежде всего дробовые шумы ФЭУ), уширивающие изображающую линию проекционной картины (при уменьшении разности хода интерферирующих пучков света вследствие повышения мощности сигнала биений роль этого фактора станет незначительной). Мгновенная реакция эллипсометра на изменение во времени поляризации исследуемого света

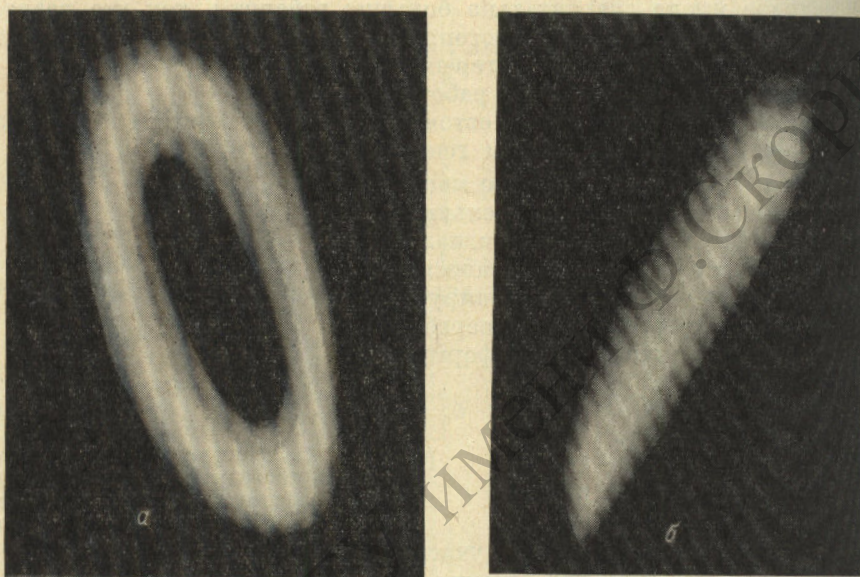


Рис. 3. Виды проекционных картин на экране ЭЛТ.
 а — эллиптическая, б — линейная наклонная поляризация.

играла положительную роль, например, при определении знака вращения для круговой поляризации: достаточно было поместить перед входным отверстием известным образом ориентированную пластинку $\lambda/4$, чтобы по углу наклона ($\pm 45^\circ$) к оси X прямой линии, высвечиваемой на экране ЭЛТ, узнать нужный параметр.

В целом эксперимент подтвердил принципиальную возможность осуществления эллипсометра с мгновенной индикацией проекционной картины излучения на экране ЭЛТ, действующего согласно описанному выше принципу. Следует отметить, что этот принцип может быть реализован в ряде других оптических схем, отличных от изображенной на рис. 1. Так, например, используя оптические элементы в виде склеенных призм, можно значительно уменьшить габариты прибора, снизить потери света и довести до минимума (вплоть до нуля) разность хода интерферирующих пучков света; последнее особенно важно для достижения интенсивного сигнала биений. Если в качестве светоделителей, аналогичных 4 и 8 на рис. 1, не используются простые диэлектрические зеркала, то дополнительный набег фазы в сигналах биений (уже не кратный π) может быть компенсирован с помощью обычного фазовращателя, помещаемого в электрическую цепь одного из фотоприемников; единственным необходимым условием при этом является применение в оптической схеме однополосного частотного модулятора света, что в настоящее время не составляет проблемы. Подобные меры, возможно, приведут к созданию удобного прибора для физических исследований.

Автор приносит благодарность Е. Л. Воскресенской и Т. Б. Толчинской за предоставление некоторых оптических деталей и В. В. Эльсгольцу за помощь в изготовлении установки.

Литература

- [1] Р. Дитчберн. Физическая оптика. Изд. «Наука», М., 1965.
- [2] М. М. Горшков. Зарубежная радиоэлектроника. № 10, 97, 1970.
- [3] У. Шерклифф. Поляризованный свет. Изд. «Мир», М., 1965.
- [4] М. Росс. Лазерные приемники. Изд. «Мир», М., 1969.
- [5] Г. Картьяну. Частотная модуляция. Ак. РНР, Бухарест, 1961.

Поступило в Редакцию 2 февраля 1971 г.

ЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорини