

PACS: 78.68.+m

В.В. Свиридов^{1,2}, Н.А. Радкевич^{1,2}, И.В. Жихарев^{1,2}

СКАНИРУЮЩИЙ ЭЛЛИПСОМЕТР НА БАЗЕ ГОНИОМЕТРА С АВТОКОЛЛИМАЦИОННОЙ ТРУБОЙ

¹Луганский национальный педагогический университет им. Тараса Шевченко
ул. Оборонная, 2, г. Луганск, 91011, Украина

²Филиал Донецкого физико-технического института им. А.А. Галкина НАН Украины
при Луганском национальном педагогическом университете имени Тараса Шевченко
ул. Оборонная, 2, г. Луганск, 91011, Украина

Статья поступила в редакцию 5 декабря 2005 года

Скомпонован сканирующий эллипсометр на базе гониометра с автоколлимационной трубой. Эллипсометр апробирован при измерениях оптических параметров стандартного образца из кварца КУ-1. Получено удовлетворительное соответствие результатов эксперимента по брюстеровскому отражению с результатами эллипсометрических измерений и с установленными стандартами по показателям преломления и поглощения для объемного образца. Установлено, что при прочих равных условиях примененное аппаратное решение дает возможность осуществлять измерения оптических параметров поверхности образца с точностью до двух-трех единиц четвертого знака. Показана возможность проведения исследований приповерхностных слоев образцов со сложными поверхностями.

Существует большое количество экспериментальных методик для исследования характеристик приповерхностных слоев различных объектов, которые формируются искусственно или вследствие воздействия окружающей среды [1–8]. Прежде всего это методы сканирующей эллипсометрии и сканирующей оптической ближнепольной микроскопии [9]. Источники погрешностей эллипсометрических измерений хорошо изучены [1,10]. В данной статье предлагается способ минимизации ошибок, вызванных неточным заданием угла падения. Введение в конструкцию эллипсометра третьего плеча, которым является штатная автоколлимационная труба гониометра, решает эту задачу.

Конструкция эллипсометра и ее особенности

Оптическая схема сканирующего эллипсометра, собранного нами [11] по схеме PSCA, представлена на рис. 1.

Блок образца (рис. 2) снабжен прецизионными подвижками, которые имеют необходимые направления. Эти подвижки используются для коррекции

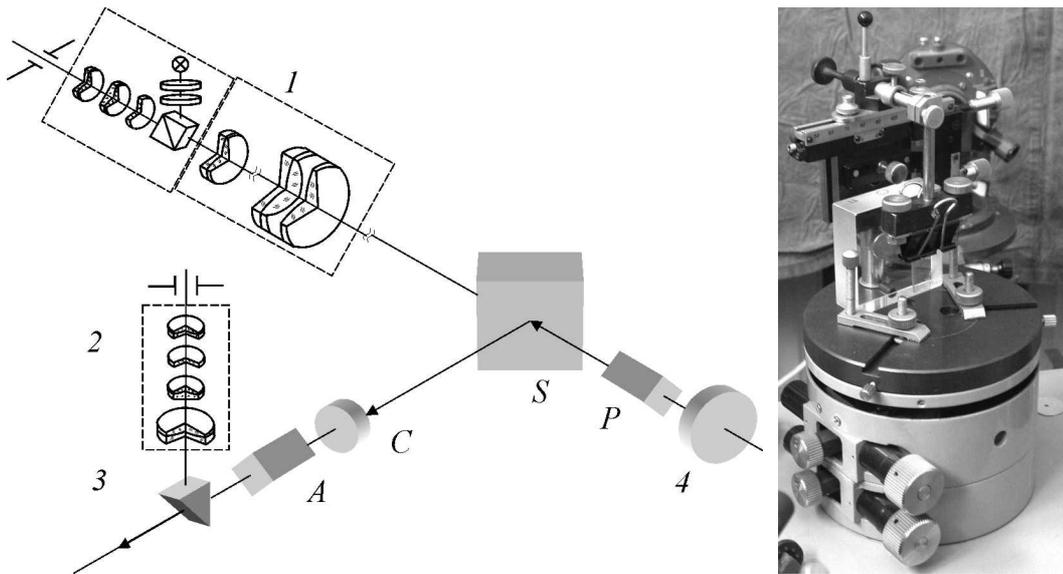


Рис. 1. Оптическая схема сканирующего эллипсометра: *1* – автоколлимационная труба с окуляр-кубом; *2* – вспомогательная труба с измерительным окуляром Гюйгенса; *3* – призма полного внутреннего отражения; *4* – выходное зеркало лазера; *A* – анализатор; *C* – компенсатор; *S* – поверхность образца; *P* – поляризатор

Рис. 2. Функциональный блок

отражающей плоскости образца относительно зондирующего луча после очередного акта сканирования. Узел сканирования представляет собой стандартный двухкоординатный препаратоводитель с ценой деления нониуса $1 \cdot 10^{-4}$ м. Он обеспечивает сканирование по исследуемому участку образца вдоль соответствующей координаты.

Плечо поляризатора состоит из двух независимых блоков. Первый блок – это поляризатор, который представляет собой одинарную поляризационную призму Франка–Риттера квадратной апертуры (сторона $7 \cdot 10^{-3}$ м). Данная призма имеет симметричное поле поляризации около $4.8869 \cdot 10^{-1}$ rad. Поляризатор вмонтирован в угломерное устройство с ценой деления нониуса $1.4544 \cdot 10^{-4}$ rad. Второй блок – это источник зондирующего излучения. В качестве такого источника применен гелий-неоновый лазер с полуконфокальным резонатором (TEM₀₀, длина волны излучения $6.328 \cdot 10^{-7}$ м, номинальная мощность $1 \cdot 10^{-3}$ W, расходимость луча $1.85 \cdot 10^{-3}$ rad). Длина плеча поляризатора такова, что диаметр пучка на образце не более $8 \cdot 10^{-4}$ м. Все элементы плеча поляризатора имеют прецизионные подвижки.

Плечо анализатора состоит из четырех блоков, жестко закрепленных в своих оправках на единой плите. Первый блок – компенсатор, представляющий собой стандартную конструкцию, которая имеет поворотную кальцитовую пластину. Последняя, как известно, применяется тогда, когда разность хода необходимо согласовывать с длиной волны зондирующего света. Цена деления нониуса компенсатора составляет 1.7453 rad. Компенсатор вмонти-

рован в угломерное устройство с ценой деления нониуса $1.4544 \cdot 10^{-4}$ rad. Второй блок – анализатор, который представляет собой одинарную призму Франка–Риттера с теми же характеристиками, что и поляризатор. Третий блок – вспомогательная труба, снабженная измерительным окуляром Гюйгенса. Ее призма полного внутреннего отражения после очередного наведения выводится из оптического канала собственной подвижкой. Вспомогательная труба обеспечивает визуальную коррекцию оптической оси плеча анализатора относительно отраженного луча. Четвертый блок – блок детектора (на рис. 1 не показан), в качестве которого применен кремниевый фотодиод с диаметром чувствительной области $1.94 \cdot 10^{-2}$ m и интегральной чувствительностью $4.7 \cdot 10^{-4}$ A/m.

Особенности юстировки эллипсометра

На этапе измерений после каждого акта сканирования всегда требуется промежуточная юстировка. Это необходимо ввиду неизбежного нарушения положения образца относительно зондирующего луча. Нарушение возникает из-за погрешностей изготовления и сборки деталей направляющих узла сканирования.

В [10] подробно описаны методы юстировки лабораторных эллипсометров. Этап механической юстировки, который заключается в правильной установке источника света, соосности плеч поляризатора и анализатора, а также отражающей поверхности образца, выполняется с помощью двух разнесенных коаксиально установленных ирисовых диафрагм с переменной апертурой. Параллельность пучка света оптических осей плеч поляризатора и анализатора определяют по гашению пучка, который прошел через уменьшаемые отверстия диафрагм. В отдельных случаях используют окуляр Гаусса. Так же поступают, если необходима юстировка промышленного эллипсометра.

По нашему мнению, методика юстировки с помощью диафрагм является трудоемкой и неоднозначной. Особенно это проявляется, когда для каждой точки исследуемой поверхности образца применяется многоугольная методика решения обратной задачи эллипсометрии.

Известно, что автоколлимационная труба с окуляр-кубом предназначена для точных угловых измерений, для выверки параллельности оптических деталей, контроля параллельности перемещений и т.д. Ее применение является удобным, эффективным и динамичным. При этом достигается предельная точность. Авторы настоящей статьи опробовали автоколлимационный метод юстировки сканирующего эллипсометра на всех этапах его работы. Тем самым решена задача контроля угла и плоскости падения настолько, насколько это позволяют технические данные примененного гониометра с автоколлимационной трубой. Например, гониометр Г5М имеет предел допускаемой погрешности при измерении угла одним приемом $\pm 2.4241 \cdot 10^{-5}$ rad при цене деления нониуса $4.8481 \cdot 10^{-6}$ rad.

Особенностью юстировки предложенной конструкции эллипсометра является эффективное использование автоколлимационной трубы гониометра и вспомогательной трубы.

Юстировка сводится к поочередному совмещению изображения окулярной сетки с проекционной сеткой окуляр-куба после ее отражения от оптических граней поляризатора и выходного зеркала лазера. В результате однозначно достигается параллельность оптических осей развернутых плеч поляризатора и автоколлимационной трубы. Показания, которые при этом фиксирует отсчетное устройство гониометра, принимаются за начальный отсчет для угла падения.

После этого проводится юстировка плеча анализатора. Она выполняется в два этапа. На первом используется плоскопараллельная пластина, которой комплектуется гониометр. Пластина устанавливается на предметный столик гониометра так, что угол падения составляет $7.854 \cdot 10^{-1}$ rad. Второй этап заключается в совмещении оптической оси плеча анализатора с отраженным лучом. Производится это соответствующими механическими подвижками. Факт совмещения фиксируется измерительным окуляром Гюйгенса вспомогательной трубы. Совмещение удается настолько точно, насколько это позволяют технические данные примененного измерительного окуляра. Например, окуляр ИО-8 имеет цену деления $1 \cdot 10^{-4}$ m.

Выбор схемы эллипсометра

В литературе приведено сравнение классических схем эллипсометров – PCSA и PSCA. Авторы [1] отмечают, что схема PSCA обладает преимуществом перед схемой PCSA, «... т.к. обеспечивает компенсацию влияния диагонального элемента (2.2) в матрице Джонса для несовершенств поляризатора». При прочих равных условиях «... обе схемы одинаково чувствительны к различным несовершенствам элементов оптических схем эллипсометра и ошибкам измерения азимутальных углов поляризатора, компенсатора и анализатора». К тому же нами выбрана эта схема, поскольку при замене плеча анализатора блоком детектора можно проводить исследования поверхности образца методом сканирующей ближнепольной микроскопии.

Численный анализ

Были проведены два эксперимента – изучение зависимостей: 1) интенсивности отраженного света от угла падения (закон Брюстера) (рис. 3) и 2) эллипсометрических углов от угла падения (обратная задача эллипсометрии) (рис. 4).

В качестве объекта исследования выбрана пластина из плавленого кварца марки КУ-1, обработанная не хуже 14-го класса и с отклонением 2 интерференционных кольца от плоскости. Отражающая поверхность очищена смесью эфира и спирта.

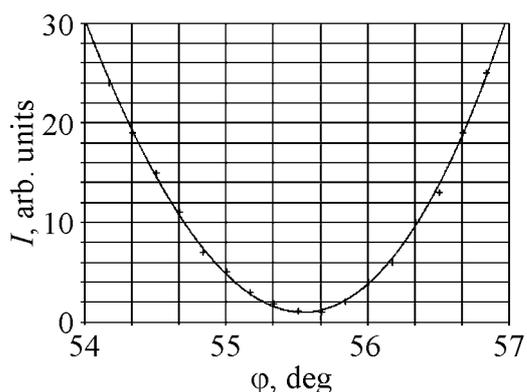


Рис. 3. Экспериментальная зависимость интенсивности отраженного света I от угла падения φ . Зондирующий пучок поляризован по кругу; + – эксперимент, — – результат нелинейной регрессии общего вида

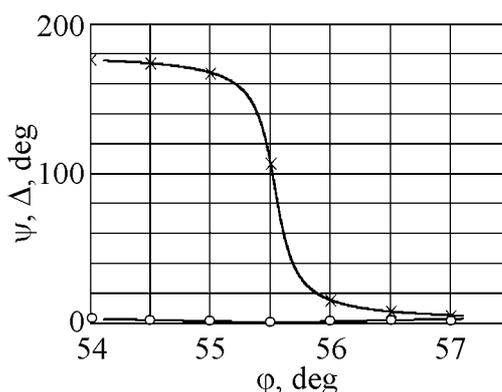


Рис. 4. Экспериментальная зависимость эллипсометрических углов ψ (—o—) и Δ (—x—) от угла падения φ ; — – результат нелинейной регрессии общего вида

В эксперименте по брюстеровскому отражению определен угол полной поляризации (угол Брюстера) и вычислен показатель преломления материала образца как тангенс этого угла, т.е. $\text{tg}\varphi_B = n$. Брюстеровская кривая построена в диапазоне по углу падения от $9.4248 \cdot 10^{-1}$ до $1.0036 \cdot 10^{-0}$ rad с шагом $2.9089 \cdot 10^{-3}$ rad для одной произвольно выбранной точки поверхности образца (рис. 3). Значения угла Брюстера и показателя преломления сведены в таблицу.

Эллипсометрические измерения проведены по многоугловой методике в диапазоне по углу падения от $9.4248 \cdot 10^{-1}$ до $9.9484 \cdot 10^{-1}$ rad с шагом $8.7267 \cdot 10^{-3}$ rad для той же точки поверхности образца, что и в первом эксперименте (рис. 4). Значения главного угла, показателя преломления и показателя поглощения сведены в таблицу.

Таблица

Методы измерения ($\lambda = 6.328 \cdot 10^{-7}$ m)	Угол полной поляризации (угол Брюстера), deg	Главный угол, deg	Показатель преломления	Показатель поглощения
Эксперимент по брюстеровскому отражению	55.5398	–	1.45717	–
Эллипсометрические измерения	–	55.5433	1.45737	0.0067
Установленные стандарты для объемного образца	–	–	1.45702	0.001

На рис. 5 показан фрагмент зависимости эллипсометрического угла ψ от угла падения вблизи главного угла.

Результаты эксперимента по брюстеровскому отражению были сопоставлены с результатами эллипсометрических измерений. Получено удовлетво-

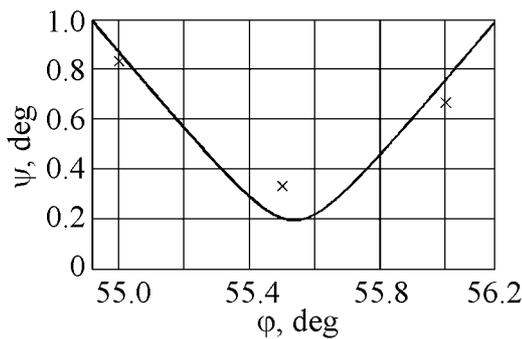


Рис. 5. Экспериментальная зависимость эллипсометрического угла ψ вблизи главного угла от угла падения ϕ

рительное согласие. Угол Брюстера и главный угол различаются на три единицы в третьем знаке, а значения показателя преломления – на две единицы в четвертом знаке. Результаты хорошо согласуются с установленными стандартами по показателям преломления и поглощения для объемного образца [12,13].

Заключение

Таким образом, введение гониометра с автоколлимационной трубой в схему сканирующего эллипсометра значительно упрощает юстировку прибора и делает операцию наведения однозначной. При использовании многоугловой методики динамичный контроль оптической схемы позволяет устранить основной недостаток сканирующих эллипсометров, который связан с неточным заданием угла и плоскости падения.

Примененное аппаратное решение при прочих равных условиях позволяет осуществлять измерения оптических параметров поверхности образца с точностью до двух-трех единиц четвертого знака.

Описанный действующий сканирующий эллипсометр дает возможность проводить исследования приповерхностных слоев образцов со сложными поверхностями.

1. *R.M.A. Azzam, N.M. Bashara*, Ellipsometry and Polarized Light, North-Holland Publishing Co, Amsterdam, New York, Oxford (1977).
2. *V. Mitin, V. Kochelap, M. Strasio*, Quantum Heterostructures. Microelectronics and Optoelectronics, University Press, Cambridge (1998).
3. *J. Davies*, The Physics of Low-dimensional Semiconductors, University Press, Cambridge (1998).
4. *H.G. Craighead, A.M. Glass*, Opt. Lett. **6**, 248 (1981).
5. *М.М. Горшков*, Эллипсометрия, Сов. радио, Москва (1974).
6. *А.Л. Звездин, В.А. Котов*, Магнитооптика тонких пленок, Наука, Москва (1988).
7. *S. Garoff, D.A. Weits, T.J. Gramila, C.D. Hanson*, Opt. Lett. **6**, 245 (1981).
8. *A.M. Glass, P.F. Liao, J.G. Bergman, D.H. Olson*, Opt. Lett. **5**, 368 (1980).
9. *О.Н. Гадомский, А.С. Кадочкин*, Оптика и спектроскопия **96**, 646 (2004).
10. *А.В. Ржанов, К.К. Свитаев, А.И. Семенов и др.*, Основы эллипсометрии, Наука, Новосибирск (1979).

11. В.В. Свиридов, Н.А. Радкевич, И.В. Жихарев, в сб.: Матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції «Науковий потенціал світу 2004», Дніпропетровськ (2004), с. 42–43.
12. *Справочник* конструктора оптико-механических приборов, В.А. Панов (ред.), Машиностроение, Ленинград (1980).
13. *Физические величины*. Справочник, И.С. Григорьев, Е.З. Мейлихов (ред.), Энергоатомиздат, Москва (1991).

V.V. Sviridov, N.A. Radkevich, I.V. Zhikharev

SCANNING ELLIPSOMETER ON BASIS OF A DIRECTION GAUGE WITH AN AUTOCOLLIMATION TUBE

The scanning ellipsometer is composed on the basis of a direction gauge with an autocollimation tube. The ellipsometer has been tested by measuring optical parameters of a standard sample from quartz KY-1. A satisfactory correspondence of the outcomes of the experiment on Bruster reflection to the results of ellipsometric measurements and to established standards on reflection index and index of absorption for a volumetric sample has been obtained. It has been proved that in other equal conditions the applied hardware solution enables to conduct measurements of optical parameters of a sample surface with the precision of 2–3 units of the fourth character. The possibility of research of near-surface layers of complex samples is demonstrated.

Fig. 1. Optical scheme of scanning ellipsometer: 1 – autocollimation tube with eyepiece-cube; 2 – supplementary tube with the gaging Huygens eyepiece; 3 – reflecting prism; 4 – exit mirror; A – analyzer; C – compensator; S – optical surface; P – polarizer

Fig. 2. Function unit

Fig. 3. Experimental dependence of reflected intensity I on angle of incidence φ . The probing beam polarized on circle; + – experiment, — – result of general non-linear regression

Fig. 4. Experimental dependence of ellipsometrical angles ψ (—○—) and Δ (—×—) on angle of incidence φ ; — – result of general non-linear regression

Fig. 5. Experimental dependence of ellipsometrical angle ψ close to principal angle on angle of incidence φ