

## СПЕКТРАЛЬНЫЙ ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ РАДИАЦИОННЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ

*А.И. Беляева, А.А. Галуза<sup>1</sup>, В.Ф. Клепиков<sup>1</sup>, В.В. Литвиненко<sup>1</sup>, А.Г. Пономарев<sup>1</sup>,  
М.А. Сагайдачный<sup>1</sup>, К.А. Слатин, В.В. Уваров<sup>2</sup>, В.Т. Уваров<sup>2</sup>*

*НТУ «Харьковский политехнический институт» МОН Украины, Харьков;*

*<sup>1</sup>Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины, Харьков;*

*<sup>2</sup>Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Харьков, Украина*

Описана проблема ранней диагностики радиационных преобразований, которые происходят на поверхности металлов и сплавов. Оптические методы рассматриваются как наиболее перспективные для исследования малых модификаций материалов. Создан автоматизированный спектральный многоугловой эллипсомер для исследования оптических свойств металлов и сплавов в видимом диапазоне спектра, разработано оригинальное математическое и программное обеспечение для управления экспериментом и первичной обработки экспериментальных данных. Проведена аттестация созданной установки, и на реальных образцах обнаружена высокая чувствительность эллипсометрических параметров к незначительным радиационным преобразованиям сплава Д16. Показана перспективность развития эллипсометрического метода для ранней оптической диагностики.

### ВВЕДЕНИЕ

Создание ядерных энергетических установок нового типа связано с необходимостью разработки методов получения материалов, способных эксплуатироваться в условиях интенсивного радиационного, теплового и химического воздействия. Одним из способов исследования физической природы превращений, обеспечивающих повышенную стойкость материалов, являются оптические методы. Им свойственна системность как с точки зрения разнообразия наблюдаемых физических эффектов, так и интерпретации полученных результатов. С учетом определяющей роли поверхностных явлений в развитии дефектов на начальной стадии разрушения, приводящих впоследствии к необратимой потере свойств объема материалов, перспективным является применение оптических методов для диагностики поверхности.

Для воспроизведения различных радиационных превращений типа переориентации и изменения размера зерен, появления зон напряженных состояний, перераспределения элементного состава на границах зерен, возникновения метастабильных фаз и др., приводящих к изменению пластических характеристик сплавов [1], целесообразно использовать сильнооточные импульсные пучки электронов. Нами облучались образцы дуралюмина Д16 на ускорителе Миг-1 импульсным пучком электронов с энергией 350 кэВ, длительностью импульса 5 мкс, током 2 кА [2]. Воздействие пучков с указанными параметрами приводит к переплаву приповерхностного слоя мишени, генерации импульса давления, распространяющегося в глубь мишени, радиационному и термическому воздействию на приповерхностный слой. Дополнительным фактором, влияющим на процессы массопереноса в расплаве, является взаимодействие тока пучка и тока, наводимого в

облучаемой мишени, поэтому пластины облучались как по нормали к поверхности, так и под углом  $45^\circ$ . Облучение под углом должно было приводить к изменению интенсивности взаимодействия токов, поэтому представлялось необходимым установить отличие свойств приповерхностного слоя, переплавленного при различных углах облучения. После облучения поверхностный слой, содержащий кратеры, сошлифовывался и полировался. Методами традиционной оптической микроскопии установлено отличие зеренной структуры облученного и необлученного образцов. Однако различие оптических свойств поверхностей образцов, облученных под различными углами, было обнаружено только с привлечением более тонких эллипсометрических методов.

Для исследования оптических свойств поверхностей облученных металлов была разработана оригинальная автоматизированная спектральная эллипсометрическая установка, детально описанная ниже. В основу созданной установки положена схема эллипсометра с вращающимся анализатором (схема RAE), которая сочетает в себе простоту с широкими возможностями.

### 1. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ

Эллипсометрия — это метод изучения поверхностей различных тел по изменению состояния поляризации светового пучка при отражении от этой поверхности. Геометрия PSA-схемы эллипсометрического эксперимента приведена на рис. 1.

Состояние поляризации электромагнитной волны может быть описано вектором Джонса [3], компонентами которого являются комплексные амплитуды проекций волны на координатные оси.

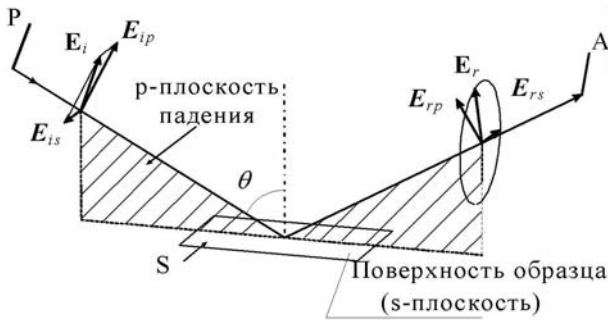


Рис. 1. Геометрия PSA-схемы эллипсометрического эксперимента:  $\theta$  - угол падения;  $E_{i(r)p(s)}$  - амплитуды  $p$ - и  $s$ - составляющих падающей ( $i$ ) и отраженной ( $r$ ) волны;  $P$  и  $A$  - положения поляризатора и анализатора;  $S$  - образец

Компоненты вектора Джонса некоторой электромагнитной волны, заданной в виде

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_p \\ E_s \end{pmatrix},$$

позволяют получить значение интенсивности излучения из соотношения:

$$I = |E_p|^2 + |E_s|^2 \quad (1)$$

На рис. 1 состояние поляризации на входе в оптическую систему PSA (поляризатор-образец-анализатор) обозначено  $E_i$ , а на выходе —  $E_r$ . Преобразование вектора Джонса, которое производит оптическая система PSA, можно записать в матричной форме:

$$\mathbf{E}_i = \begin{pmatrix} E_{ip} \\ E_{is} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A & \sin A \\ -\sin A & \cos A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_p & 0 \\ 0 & R_s \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos P & -\sin P \\ \sin P & \cos P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{ip} \\ E_{is} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{rp} \\ E_{rs} \end{pmatrix} = \mathbf{E}_r \quad (2)$$

где  $A$  и  $P$  — азимуты анализатора и поляризатора соответственно;  $R_p$  и  $R_s$  — комплексные коэффициенты Френеля образца.

Следует обратить внимание, что в эллипсометрии оптический элемент схемы и угол его поворота обозначают одинаковыми символами.

Углом поворота оптического элемента (его азимутом) в эллипсометрии принято считать поворот против часовой стрелки при наблюдении против направления распространения луча.

Подставив (2) в (1) и раскрыв скобки, получим:

$$I(A) = M \{ 1 - \cos 2\Psi (\cos 2P + \cos 2A) + \cos 2P \cos 2A + \sin 2A \sin 2P \sin 2\Psi \cos \Delta \}, \quad (3)$$

где  $M$  — постоянный множитель, не зависящий от азимута анализатора  $A$ , а  $\Psi$  и  $\Delta$  - эллипсометрические углы, описывающие эллипс поляризации после отражения от образца. Именно  $\Psi$  и  $\Delta$  подлежат определению в ходе эллипсометрического

эксперимента в результате анализа экспериментальной зависимости  $I(A)$ .

Выражение (3) используется при описании сигнала, фиксируемого фотодетектором, для извлечения эллипсометрических параметров. Однако для получения  $\Psi$  и  $\Delta$  достаточно только переменной части сигнала, зависящей от азимута анализатора. Кроме того, в эллипсометрии с вращающимся анализатором для упрощения расчетов поляризатор фиксируется под углом  $P=45^\circ$ . При этом (3) принимает вид:

$$I(A) = 1 - \cos(2\Psi) \cos(2A) + \sin(2\Psi) \cos(\Delta) \sin(2A), \quad (4)$$

где  $I$  — интенсивность света на фотоприемнике;  $A$  — угол поворота анализатора;  $\Psi$  и  $\Delta$  — искомые эллипсометрические параметры.

Выражение (4) является основным рабочим выражением для анализа результатов измерений на эллипсометре с вращающимся анализатором, где  $I(A)$  — результат эксперимента, а  $\Psi$  и  $\Delta$  — величины, подлежащие определению. Как будет показано ниже, оценка  $\Psi$  и  $\Delta$  по  $I(A)$  — достаточно сложная задача, решение которой будет рассмотрено детально в разд. 4.

Определенные значения  $\Psi$  и  $\Delta$  используются для получения информации о физических характеристиках образца. Для этого, как правило, используется выражение, связывающее  $\Psi$  и  $\Delta$  с коэффициентами Френеля поверхности, которые, в свою очередь, зависят от ее оптических констант. Это выражение называется основным уравнением эллипсометрии и имеет вид:

$$\frac{R_p}{R_s} = \tan \Psi \cdot e^{i\Delta}. \quad (5)$$

Конкретный вид (5) зависит от выбора модели исследуемого образца.

## 2. ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКАЯ СХЕМА СПЕКТРАЛЬНОГО ЭЛЛИПСОМЕТРА

Оптическая схема созданного спектрального эллипсометра с вращающимся элементом (RASE) приведена на рис. 2.

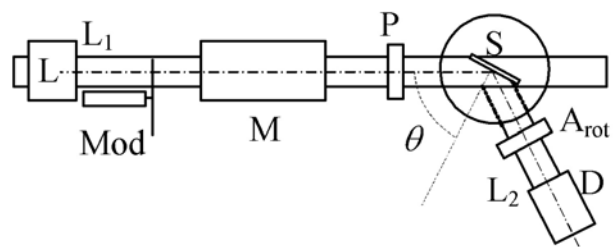


Рис. 2. Принципиальная оптическая схема RASE.

$L$  — источник излучения;  $Mod$  — модулятор;  $M$  — монохроматор;  $P, A$  — поляризатор и анализатор;  $S$  — исследуемый образец;  $D$  — фотодетектор;  $\theta$  — угол падения света на образец

Все оптические элементы эллипсометра располагаются на двух плечах — подвижном и неподвижном. На неподвижном плече  $L_1$  крепятся тяжелые элементы, не требующие перемещения в процессе работы, — источник (L), монохроматор (M), модулятор (Mod) и поляризатор (P). На подвижном плече  $L_2$  закрепляется анализатор (A) и фотодетектор (D).

Расходящийся пучок света попадает на коллиматор, далее уже параллельный пучок модулируется меандром с помощью механического прерывателя. Затем свет диспергируется в монохроматоре, после чего монохроматическое излучение линейно поляризуется элементом P. При отражении от поверхности образца S поляризация света, в общем случае, становится эллиптической. Эллипс поляризации фиксируется в виде набора значений интенсивности на выходе анализатора при различных значениях азимута поворота A. Этот набор и является результатом одного измерения.

Источником излучения служит монохроматор ДМР-4 (M), освещаемый галогеновой лампой накаливания КГМ-75 (L) (рис. 2). Такая осветительная система позволяет получать монохроматическое излучение достаточной интенсивности в диапазоне 300...2000 нм.

В качестве основного приемника используется фотоумножитель ФЭУ-100, рабочий спектральный диапазон которого составляет 300...800 нм. Для продвижения в инфракрасную область спектра ФЭУ-100 может быть заменен на другой приемник без существенных изменений оптико-механической схемы.

Измерения могут проводиться при различных углах падения света на образец. Созданная конструкция позволяет изменять угол падения  $\theta$  в диапазоне 40...75°. Образец располагается на вращающемся столике с лимбом, отсчет значений которого осуществляется с помощью нониуса с точностью 0.1°.

Конструктивно прибор собран на стандартных оптических рельсах, на которых располагаются оптические элементы на рейтерах. Это делает конструкцию достаточно универсальной и позволяет при незначительных изменениях конфигурации использовать прибор в качестве спектрофотометра, поляриметра и рефлектометра в соответствующем спектральном диапазоне и разных углах падения.

### 3. СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Схема RASE как объекта управления приведена на рис. 3. Данная система управления является реализацией универсальной системы автоматизации эксперимента, описанной в [4-6].

Вращающиеся части эллипсометра (анализатор и барабан монохроматора) приводятся в движение с помощью шаговых двигателей (EM-93 1808) со встроенной редукцией 48 шагов/об. вала и максимальной частотой переключения обмоток 50 Гц. Движение с внешнего вала через шестерни передается на оправку анализатора. Общее передаточное число составляет 27300 шагов двигателя на один

оборот анализатора, что позволяет получить точность позиционирования 0,01°.

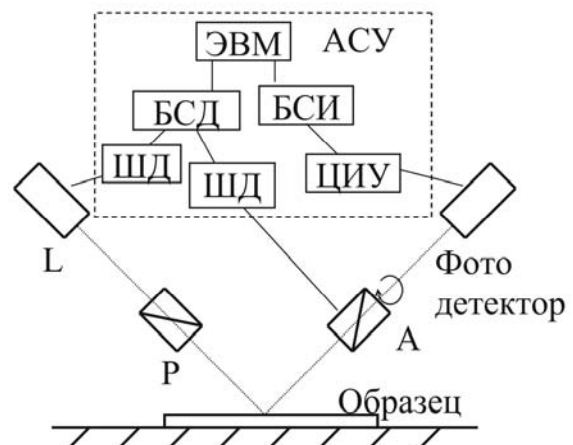


Рис. 3. Принципиальная схема автоматизации эллипсометра с вращающимся анализатором: L — источник монохроматического света; P — поляризатор; A — анализатор; БСД — блок сопряжения с двигателями; БСИ — блок сопряжения с измерительным устройством; ШД — шаговый двигатель; ЦИУ — цифровое измерительное устройство

Интенсивность излучения регистрируется фотоэлектронным умножителем ФЭУ-100. Измеряемой физической величиной является ток ФЭУ, который фиксируется комбинированным цифровым прибором В7-21. Этот стандартный прибор имеет параллельный цифровой выход, данные из которого заводятся в компьютер через оригинальный блок сопряжения [6].

В ходе измерения анализатор вращается шаговым двигателем, останавливаясь в определенных точках для измерения интенсивности. Как показано ниже, для достижения необходимой точности определения  $\Psi$  и  $\Delta$  достаточно 30 точек, равномерно распределенных по всему обороту анализатора. В то время, когда анализатор остановлен, считывается значение интенсивности с фотодетектора. Такой режим работы с остановками применяется для исключения погрешности измерения, связанной с интегрированием сигнала по азимуту A. Таким образом, для фиксированной длины волны  $\lambda$  и угла падения  $\theta$  фиксируется ряд из N пар значений  $(A_i, I_i)_{i=1}^N$ , который и является одним измерением.

Дополнительная обработка сигнала с фотодетектора позволяет демодулировать сигнал. Механизм синхронного детектирования используется для погашения помех, связанных с колебанием питающего напряжения фотодетектора, источника и для отсекания темнового тока ФЭУ.

Для повышения точности измерения применяется двухзонная методика, которая заключается в измерении образца при фиксированном угле падения  $\theta$ , длине волны  $\lambda$  и при различных других параметрах, при которых теоретически должны быть одинаковые результаты измерений, чего, однако, не случается на практике в результате асимметрии в опти-

ческой схеме прибора. Усреднение по разным зонам, как правило, позволяет компенсировать эти систематические ошибки и существенно повысить точность. В созданном эллипсомере две различные зоны создаются различными положениями поляризатора  $P$ . Его положения  $\pm 45^\circ$  с точностью до знака в выражении (4) дают одинаковые результаты.

На рис. 4 показаны результаты применения двухзонной методики (приведены результаты двух зон и их усреднение), а также соответствующие данные, полученные на серийном лазерном эллипсомере ЛЭФ-3М-1 на длине волны  $\lambda = 632.8$  нм. Видно, что данные, полученные при усреднении по двум зонам, существенно лучше совпадают с данными лазерного эллипсометра.

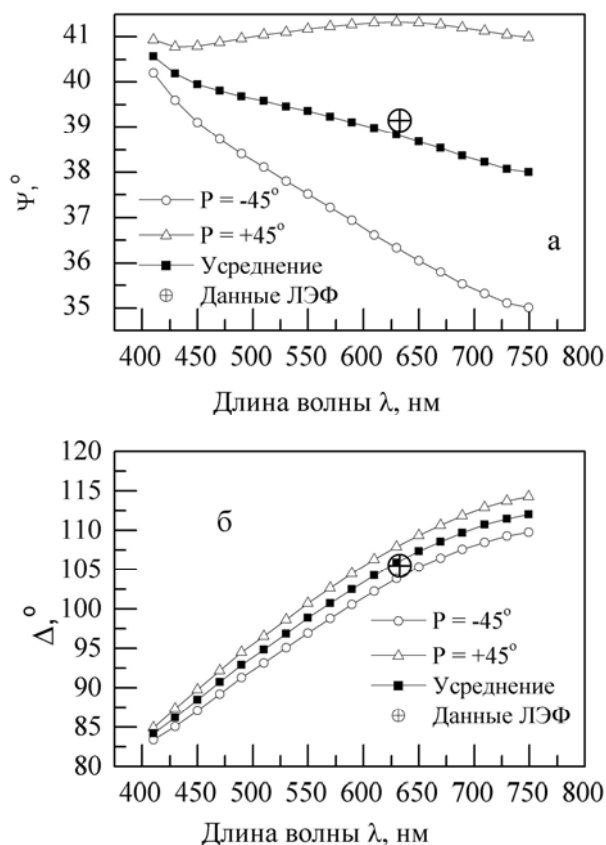


Рис. 4. Результаты определения  $\Psi$  (а) и  $\Delta$  (б) по двухзонной методике и их сравнение с данными лазерного эллипсометра

Таким образом, двухзонная методика позволяет существенно повысить точность измерений. Количественная оценка точности, которая обеспечивается созданным прибором, будет дана в разд. 6.

#### 4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Итак, работа эллипсометра с вращающимся анализатором заключается в измерении зависимости интенсивности  $I(A)$ . Уравнение (4) устанавливает математическую связь между  $I(A)$  и искомыми величинами  $\Psi$  и  $\Delta$ . Первичная обработка экспериментальных данных заключается в вычислении значе-

ний  $\Psi$  и  $\Delta$ , которые собственно и являются конечным результатом измерений.

Таким образом, нужно решить задачу извлечения  $\Psi$  и  $\Delta$  из набора экспериментальных данных  $(A_i, I_i)_{i=1}^N$ . Для этого обычно применяется метод, основанный на использовании преобразования Фурье [3].

При таком подходе ряд  $(A_i, I_i)_{i=1}^N$  представляется с помощью преобразования Фурье в виде суммы двух гармоник с частотами  $2A$ , а  $-\cos(2\Psi)$  и  $\sin(2\Psi)\cos(\Delta)$  рассчитываются как амплитуды этих колебаний. Как показали наши исследования, метод Фурье имеет ряд недостатков, основные из которых:

- 1 - высокая чувствительность к шуму;
- 2 - необходимость фиксировать интенсивность для целого количества периодов вращения анализатора;
- 3 - необходимость маленького шага дискретизации для достижения удовлетворительной точности.

Таким образом, этот метод сложно назвать идеальным, и вопрос о разработке альтернативных методов остается актуальным.

В данной работе предлагается оригинальная методика расчета эллипсометрических параметров  $\Psi$  и  $\Delta$ . Данный подход основан на аппроксимации экспериментальных данных теоретической кривой (4) по методу наименьших квадратов.

Прежде всего составим квадратичный функционал невязки:

$$F(C_1, C_2) = \sum_{i=1}^N (I_i - I_{appr}(A_i))^2,$$

где

$$I_{appr}(A) = C_1 \cos(2A) + C_2 \sin(2A) \quad (6)$$

и

$$C_1 = -\cos(2\Psi); \quad C_2 = \sin(2\Psi)\cos(\Delta).$$

Далее составим систему уравнений для его минимизации по переменным  $C_1, C_2$ :

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial C_1} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial C_2} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

В результате решения этой системы получаем связь между эллипсометрическими параметрами и набором измеренных пар значений  $(A_i, I_i)_{i=1}^N$ :

$$\begin{cases} \Psi = \frac{1}{2} \arccos(-C) \\ \Delta = \arccos\left(\frac{D}{\sqrt{1-C^2}}\right), \end{cases}$$

где  $C$  и  $D$  вычисляются по  $(A_i, I_i)_{i=1}^N$  на основании соотношений:

$$CC = \sum_{i=1}^N (\cos^2(2A_i)), \quad SS = \sum_{i=1}^N (\sin^2(2A_i)),$$

$$CS = \sum_{i=1}^N (\cos(2A_i)\sin(2A_i)),$$

$$IC = \sum_{i=1}^N (I_i \cos(2A_i)), \quad IS = \sum_{i=1}^N (I_i \sin(2A_i)),$$

$$D = \frac{IC \cdot CS - CC \cdot IS}{CS^2 - SS \cdot CC}, \quad C = \frac{IC \cdot SS - CS \cdot IS}{CS^2 - SS \cdot CC}.$$

Для предельного значения  $N = 2$  (два измерения на один оборот анализатора) аппроксимация выражается в систему двух переменных с двумя неизвестными.

Рис. 5 иллюстрирует работу метода на модельном примере. Показан исходный модельный сигнал  $I(A)$ , рассчитанный при  $\Psi = 27^\circ$  и  $\Delta = 85^\circ$ , набор его зашумленных отсчетов (гауссовский шум со среднеквадратическим отклонением 0.1)  $I_i(A_i)$ , моделирующий реальные измерения, и кривая, построенная на основании расчета по восстановленным из зашумленных данных значениям  $\Psi = 27.92^\circ$  и  $\Delta = 85.82^\circ$ .

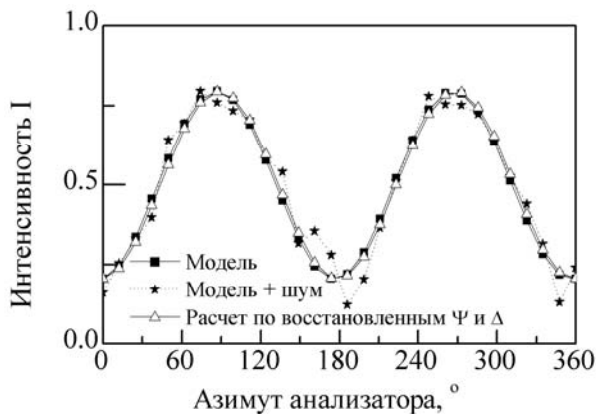


Рис. 5. Пример работы созданного метода первичной обработки экспериментальных данных

На рис. 6 показан сравнительный анализ метода Фурье и созданного метода. Приведены зависимости погрешностей определения  $\Psi$  (см. рис. 6,а) и  $\Delta$  (см. рис. 6,б) от количества отсчетов на один оборот для различных значений отношений шум/сигнал. Видно, что при малых значениях амплитуды шума и при малом количестве отсчетов предлагаемый метод существенно более устойчив к зашумленности сигнала и требует меньшего количества точек для достижения той же точности, чем метод, основанный на преобразовании Фурье. Поскольку в реальном эксперименте отношение шум/сигнал имеет значение порядка 0.01, а количество отсчетов желательно минимизировать, предлагаемый метод более предпоч-

тителен. Кроме того, он позволяет произвести расчет по любому участку периода вращения анализатора.

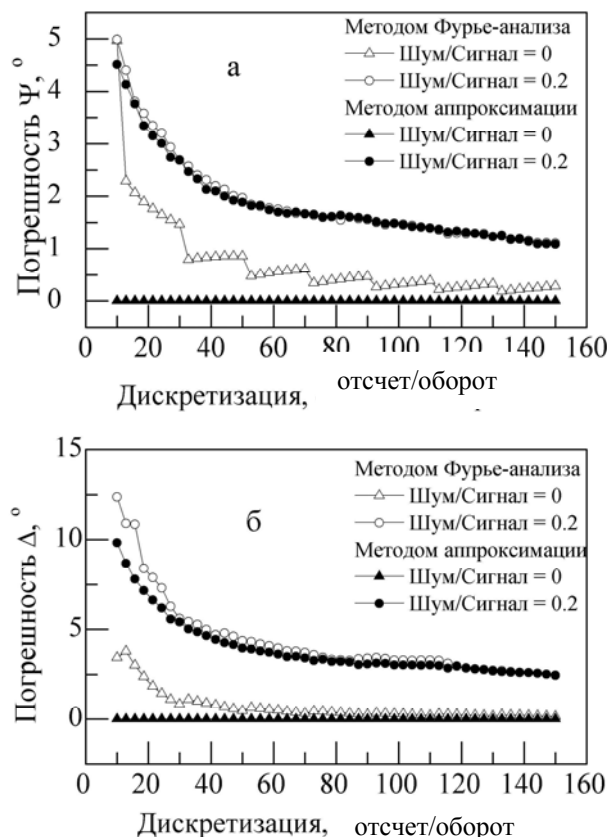


Рис. 6. Зависимость погрешностей восстановления  $\Psi$  (а) и  $\Delta$  (б) от количества отсчетов при различных отношениях шум/сигнал

## 5. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ

Для количественной интерпретации эллипсометрических измерений необходимо задать физическую модель исследуемой поверхности. Сама по себе задача выбора модели весьма нетривиальна и в каждом конкретном случае требует индивидуального подхода. Для наиболее полного обоснования выбора модели необходимо привлекать дополнительные независимые методики.

С этой целью созданный эллипсометрический комплекс используется совместно с другими оптическими методиками такими, как рефлектометрия [7], оптическая микроскопия (включая поляризационную) и микроинтерферометрия [8]. Это позволяет не только всесторонне исследовать поверхность, но и привлечь дополнительную независимую информацию для построения адекватных моделей при интерпретации спектров эллипсометрических параметров.

## 6. АТТЕСТАЦИЯ УСТАНОВКИ

Тестирование созданной установки было выполнено путем сравнения полученных на ней результатов с результатами измерений на штатном лазерном ноль-эллипсометре ЛЭФ-3М-1 ( $\lambda = 633$  нм). На се-

годняшний день лазерные эллипсометры, построенные по нулевым схемам, являются наиболее совершенными приборами с точки зрения точности получаемых результатов. Кроме того, на ЛЭФ-3М-1 измерения проводились по четырехзонной методике, которая позволяет практически полностью исключить аппаратную ошибку, хотя и значительно увеличивает время и трудоемкость измерений. Сказанное позволяет рассматривать результаты, которые получены на ЛЭФ-3М-1, в качестве эталона.

Многочисленные исследования показали, что результаты, полученные на RASE на длине волны  $\lambda = 633$  нм, совпадают с аналогичными данными, полученными на ЛЭФ-3М-1, с точностью  $\sim 10'$  для  $\Psi$  и  $\sim 10'$  для  $\Delta$  на различных углах падения излучения на образец. Частично имеющиеся расхождения объясняются тем, что в ЛЭФ-3М-1 используется узкополосное когерентное излучение и зондирующий пучок имеет очень малый угол расходимости. С другой стороны, в RASE используется излучение, спектральная полоса которого ограничена шириной щели монохроматора, а параллельность пучка, сравнимая с лазерным, недостижима принципиально.

## 7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Созданная методика была использована для диагностики радиационных преобразований в дуралюмине Д16, вызванных сильноточными импульсными пучками электронов. Описание режимов облучения дано во введении.

В ходе исследований была изучена серия идентичных образцов сплава Д16. Для всех образцов были получены близкие результаты, поэтому в настоящей работе приводятся результаты исследования только трех из них. Образец К1 не подвергался никаким радиационным воздействиям, образец К2 облучался пучком, перпендикулярным поверхности, а образец К3 – под углом  $45^\circ$  к поверхности. Все образцы были изготовлены из одной заготовки и полировались идентично.

Прежде всего, образцы исследовались с помощью микроскопических методик (см. разд. 5), которые никаких положительных результатов не дали: все образцы выглядели идентично.

Далее образцы были исследованы на созданном спектральном эллипсометре. На рис. 7 показаны экспериментальные спектры  $\Psi$  и  $\Delta$  для образцов К1, К2 и К3, полученные на RASE на угле падения  $72^\circ$ .

Из рисунка видно, что для  $\Psi$  все три кривые существенно отличаются, причем образец К1 (необлученный) отличается от К2 и К3 сильнее, чем К2 и К3 отличаются между собой. По  $\Delta$  отличие между К2 и К3 менее заметно ( $\Delta$  приведено в большем масштабе), хотя тоже имеет место.

Для контроля спектральных измерений образцы исследовались также и на лазерном эллипсометре (см. рис. 7,б). Видно, что они количественно совпадают со спектральными кривыми и повторяют качественную закономерность влияния угла облучения на эллипсометрические углы.

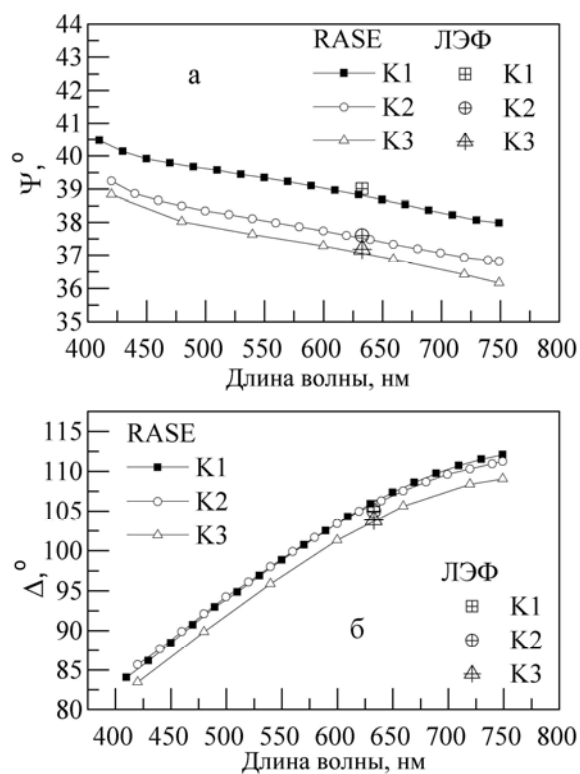


Рис. 7. Спектры эллипсометрических параметров  $\Psi$  (а) и  $\Delta$  (б) образцов К1 – К3 и результаты измерений на лазерном эллипсометре

Кроме того, были исследованы зависимости эллипсометрических углов от угла падения света для всех трех образцов. Результаты этих исследований приведены на рис. 8.

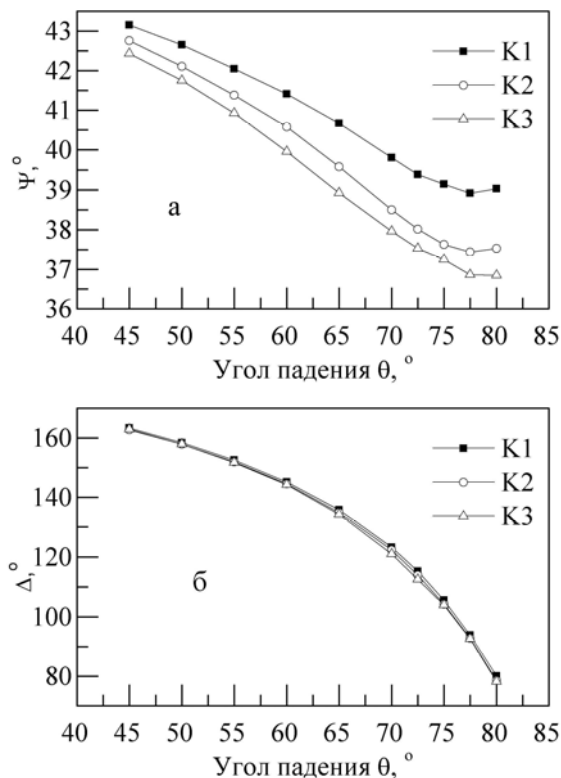


Рис. 8. Зависимости эллипсометрических параметров  $\Psi$  (а) и  $\Delta$  (б) от угла падения света для образцов К1 – К3 при длине волны  $\lambda = 633$  нм

Из рис. 7 и 8 видно, что не только спектры эллипсометрических параметров чувствительны к изменению угла облучения, но и угловые зависимости. Причем, если для  $\Delta$  чувствительной является только область больших углов падения, то для  $\Psi$  чувствительность сохраняется во всем исследованном интервале углов.

Наличие полученных закономерностей открывает, во-первых, принципиальную возможность качественного и количественного исследования процессов, протекающих на поверхности функциональных материалов при облучении, а во-вторых, позволяет рассматривать эллипсометрию как эффективную неразрушающую методику ранней диагностики радиационных преобразований в материалах на тех этапах, когда другими методами это сделать невозможно.

## 8. ВЫВОДЫ

Таким образом, в настоящей работе создан спектральный эллипсометрический комплекс для исследования радиационных преобразований в металлах и сплавах. Прибор автоматизирован и управляется с помощью ЭВМ. Реализован электронный и программный интерфейс связи с компьютером, создано специализированное математическое и программное обеспечение для автоматического управления и обработки результатов измерений.

Прибор был использован для исследования влияния угла падения электронного пучка на образцы сплава Д16. Показано, что для исследованных режимов облучения при микроскопических исследованиях визуальных изменений морфологии поверхности дуралюмина Д16 не наблюдается. Однако эллипсометрические измерения указывают на появление заметных изменений в оптических свойствах поверхности. Таким образом, установлено, что с помощью созданного комплекса влияние радиационных факторов может быть изучено на самых ранних этапах формирования дефектной области.

Работа выполнена в рамках Государственной программы фундаментальных и прикладных исследований по проблемам использования ядерных материалов и ядерных и радиационных технологий в сфере развития отраслей экономики на 2004–2010 годы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.В. Брюховецкий, В.В. Литвиненко, В.Ф. Клепиков и др. Влияние импульсного электронного облучения на параметры сверхпластичности дуралюмина // *Физика и химия обработки материалов*. 2002, №4, с.33-38.
2. В.Т. Уваров, Ю.В. Ткач, Н.П. Гадецкий и др. *Получение сильноточных пучков микросекундной длительности с высоким к.п.д.*: Препринт ХФТИ 84-30. М.: ЦНИИАтоминформ, 1984, 13 с.
3. Н. Fujiwara. *Spectroscopic ellipsometry: principles & applications*. Chichester: John Wiley & Sons, 2007, 370 p.
4. А.А. Галуза, А.Д. Кудленко, К.А. Слатин и др. Система автоматизации спектрального криогенного эллипсометра // *Приборы и техника эксперимента*. 2003, №4, с. 98 - 101.
5. А.С. Власенко, А.А. Галуза, А.Я. Захарченко. Программное обеспечение универсальной системы автоматизации эксперимента // *Радиоэлектроника и информатика*. 2006, №4, с. 52-56.
6. А.И. Галуза, А.А. Галуза, К.А. Слатин и др. Универсальная система автоматизации эксперимента // *Радиоэлектроника и информатика*. 2004, №1, с. 66-69.
7. А.А. Галуза, А.И. Галуза. Широкодиапазонный многоугловой автоматизированный спектрофотометр-рефлектометр // *Ученые записки Таврического национального университета*. 2008. 8. А.И. Беляева, А.А. Галуза, А.Д. Кудленко. Программно-аппаратный комплекс для микроинтерферометрических исследований // *Приборы и техника эксперимента*. 2008, №5.

*Статья поступила в редакцию 02.09.2008 г.*

## СПЕКТРАЛЬНИЙ ЕЛЛПСОМЕТРИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ РАДІАЦІЙНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ В МЕТАЛАХ ТА СПЛАВАХ

*А.І. Беляєва, О.А. Галуза, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко, А.Г. Пономарьов, М.А. Сагайдачний, К.О. Слатин, В.В. Уваров, В.Т. Уваров*

Описана проблема ранньої діагностики радіаційних перетворень, які відбуваються на поверхні металів та сплавів. Оптичні методи розглядаються як найперспективніші для дослідження незначних модифікацій матеріалів. Створено автоматизований спектральний багатокутовий еліпсометр для дослідження оптичних властивостей металів та сплавів у видимому діапазоні спектра, розроблено оригінальне математичне та програмне забезпечення для керування експериментом і первинної обробки експериментальних даних. Проведена атестація створеної установки, та на реальних зразках виявлена висока чутливість еліпсометричних параметрів до незначних радіаційних перетворень сплаву Д16. Показана перспективність розвитку еліпсометричного метода для ранньої оптичної діагностики.

## SPECTRAL ELLIPSO-METRIC COMPLEX FOR EARLY DIAGNOSTICS OF METALL AND ALLOY TRANSFORMATIONS

*A.I. Belyaeva, A.A. Galuza, V.F. Klepikov, V.V. Litvinenko, A.G. Ponomarev, M.A. Sagajdachny, K.A. Slatin, V.V. Uvarov, V.T. Uvarov*

The paper deals with to the problem of early diagnostics of radiation transformations that occur on metal and alloy surfaces. Optical methods are considered to be promising for investigation of marginal changes in metals. An automatic spectral multi-angle ellipsometer was created for metal surfaces optical properties investigation in visible spectral range. Original mathematical algorithm and software were developed for experiment management and initial experimental data processing. Verification of the created equipment was performed. High sensitivity to radiation transformations was discovered in real samples of D16 alloy. Ellipsometric method was shown to be perspective for early optical diagnostics.