

А. И. Беляева¹, А. А. Галуза², **В. К. Киселев³**, И. В. Коленов², А. А. Савченко¹,
Е. М. Кулешов³, С. Ю. Серебрянский³

¹Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
21, ул. Фрунзе, г. Харьков, 61002, Украина

²Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины
13, ул. Гуданова, г. Харьков, 61024, Украина

³Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, г. Харьков, 61085, Украина

E-mail: aibelyaeva@mail.ru

КВАЗИОПТИЧЕСКОЕ МАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ НА ДАННЫЕ ОПТИЧЕСКОЙ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ

Эллипсометрия – высокочувствительный, бесконтактный, неразрушающий метод исследования поверхностей и межфазных границ, основанный на изучении изменения состояния поляризации зондирующей электромагнитной волны в результате ее взаимодействия с границей раздела. Особую проблему при анализе эллипсометрических данных представляют дефекты поверхности, к которым можно отнести шероховатость, островковые пленки, регулярный рельеф, отдельные локализованные дефекты. На сегодняшний день не существует адекватных моделей, описывающих влияние локализованных дефектов поверхности на результаты эллипсометрических экспериментов. Ранее было выдвинуто предположение, что локализованные дефекты при определенных условиях могут не влиять на эллипсометрические данные. Целью работы является проверка этой гипотезы путем проведения систематических исследований влияния дефектов в форме параллелепипедов различных размеров на эллипсометрические данные. С помощью созданного терагерцевого эллипсометра, работающего на длине волны $\lambda = 2,2$ мм (0,14 ТГц), проведено масштабное моделирование влияния дефектов, характерных для поверхности, подвергнутой радиационному распылению, на результаты эллипсометрического эксперимента в оптическом диапазоне. Такая большая рабочая длина волны позволяет формировать на поверхности дефекты заданной формы и размеров и исследовать их влияние на эллипсометрические параметры. Приведено описание эллипсометра, а также результаты систематических исследований влияния различных дефектов на поверхности материала с сильным поглощением на данные эллипсометрии. Впервые экспериментально доказано, что локализованные дефекты, сравнимые по размеру с длиной волны, могут быть «невидимыми» для эллипсометрической методики. Ил. 6. Табл. 1. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: эллипсометрия, терагерцевый эллипсометр, масштабное моделирование, локализованные дефекты.

Эллипсометрия – высокочувствительный, бесконтактный, неразрушающий метод исследования поверхностей и межфазных границ, основанный на изучении изменения состояния поляризации зондирующей электромагнитной волны в результате ее взаимодействия с границей раздела [1]. На принципах эллипсометрии построены чувствительные бесконтактные методы исследований оптических и структурных параметров поверхности твердых тел и жидкостей, многослойных пленочных систем, процессов абсорбции, коррозии и др.

Результатом классического эллипсометрического эксперимента являются эллипсометрические параметры (или углы) Ψ и Δ , которые характеризуют относительные изменения при отражении амплитуд (Ψ) и разности фаз (Δ) p - и s -компонент электромагнитной волны.

Зависимость между оптическими постоянными поверхности и эллипсометрическими углами устанавливается с помощью основного уравнения эллипсометрии

$$\rho = \operatorname{tg} \Psi e^{i\Delta} = \frac{R_p}{R_s}, \quad (1)$$

где $R_{p(s)}$ – комплексные коэффициенты Френеля для p - и s -компонент. Так как эллипсометрия измеряет отношение двух величин, а не их абсолютные значения, это очень точный и воспроиз-

водимый метод, устойчивый к рассеянию и флуктуациям интенсивности зондирующего излучения. Кроме того, он не требует контрольного образца или опорного измерительного канала, как это нужно, например, для измерения коэффициента отражения.

Эллипсометрия является косвенной методикой, т. е. для определения искомым параметров исследуемых объектов необходимо решить уравнение (1) относительно этих параметров. Конкретный вид правой части (1) определяется физической и математической моделями исследуемой системы. На сегодняшний день выбор адекватной модели системы является основной проблемой при анализе эллипсометрического эксперимента. Как правило, исследователи используют модель чистой поверхности или модель многослойной системы, состоящей из однородных плоскопараллельных слоев с резкой границей между ними [1]. В чистом виде подобные модели могут быть использованы без надлежащего обоснования только в отдельных случаях. В большинстве же реальных задач подобные планарные модели могут рассматриваться только как приближения.

Особую проблему при анализе эллипсометрических данных представляют дефекты поверхности, к которым можно отнести шерохова-

тость, островковые пленки, регулярный рельеф, отдельные локализованные дефекты (включения в материал других фаз, блистеринг, зерна и др. [2–6]). В настоящее время подобные системы описываются либо моделями эффективных сред (которые все равно сводятся к однородным пленкам), либо случайными полями с некоторыми статистическими параметрами [2].

Практическую ценность на сегодня представляет только использование эффективных сред. При этом полностью отсутствуют модели, позволяющие учитывать локализованные дефекты, которые нельзя описать статистическими методами. Более того, нет даже четкого понимания, как те или иные типы дефектов влияют на величины, измеряемые в эллипсометрическом эксперименте. Во многом это обусловлено тем, что создание модели поверхности оптического качества с заранее хорошо известной структурой и параметрами дефектов крайне затруднительно, поскольку речь идет о субмикронах и даже наномасштабах. Это делает проблематичным экспериментальное изучение влияния локализованных дефектов на эллипсометрические данные.

В то же время потребность в подобных исследованиях существует. В частности, в наших предыдущих работах [3, 4] исследовались образцы вольфрама, распыленные ионами дейтерия, которые характеризовались высокой концентрацией локализованных дефектов. Оказалось, что оптическая эллипсометрия практически не чувствует наличия подобных дефектов. Было сформулировано предположение, что при определенных соотношениях длины волны зондирующего излучения, размеров дефектов и их плотности эллипсометрия перестает их «замечать» (хотя коэффициент зеркального отражения падает значительно), так как основная часть энергии отражается от дефектов диффузно и не попадает в приемник [3, 4].

С другой стороны, при исследованиях образцов медных сплавов, подвергнутых аналогичной обработке, которые также имели значительное количество локализованных дефектов, было зафиксировано очень сильное влияние морфологии поверхности на эллипсометрические параметры [5, 6]. Более того, при определенных степенях воздействия были обнаружены «нетрадиционные» угловые зависимости параметра Ψ : характерный экстремум этой величины в области главного угла остается, но минимум сменяется максимумом (рис. 1, а). При этом наблюдалось изменение знака кривизны на угловой зависимости Δ (рис. 1, б) и резкое увеличение значения параметра Ψ , особенно в области больших углов (рис. 1, а).

Все обнаруженные особенности нельзя объяснить в рамках известных моделей шероховатого слоя. Предложенные в работах [3–6] моде-

ли являются разумными и физически обоснованными, но прямого подтверждения до сих пор не имели.

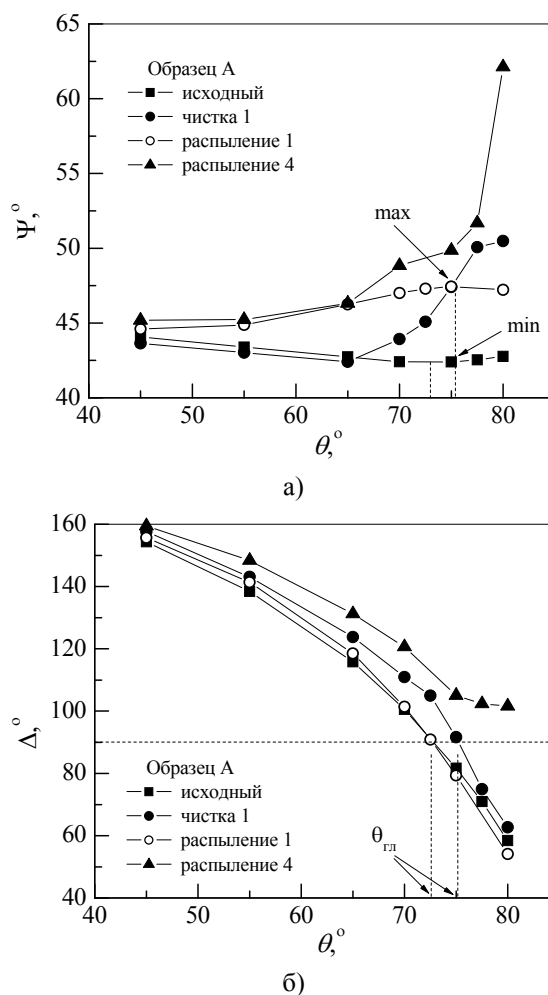


Рис. 1. Угловые зависимости эллипсометрических параметров Ψ (а) и Δ (б) для образца низколегированного сплава системы Cu-Cr-Zr А (исходные и на разных стадиях обработки) [5]

В связи со значительным прогрессом, достигнутым в развитии техники миллиметрового ($\lambda = 1 \dots 3$ мм) и субмиллиметрового ($\lambda = 0,1 \dots 1$ мм) диапазонов радиоволн, и открывающимися большими возможностями применения их для исследования широкого круга особенностей твердых тел (энергетического спектра сильно скореллированных систем, при решении задач дефектоскопии, диагностики плазмы и др.) перспективным становится развитие метода радиоволновой эллипсометрии [7, 8]. Среди многих возможностей этого метода следует обратить внимание на практическую возможность с его помощью реализовать модельные системы с идеальными границами раздела, что особенно важно для экспериментальной проверки теоретических результатов. Кроме того, возможно реализовать на практике модели различных шероховатых поверхнос-

тей на миллиметровом уровне и с приемлемой точностью экспериментально проверить решения ряда принципиальных задач такого типа. Таким образом, развитие радиоволновой эллипсометрии не только расширяет круг задач, решаемых данным методом, но и позволяет осознанно проводить дальнейшие исследования эллипсометрии оптического диапазона.

В настоящей работе применен автоматизированный квазиоптический терагерцевый нуль-эллипсометр для исследования материалов и систем на частоте 0,14 ТГц ($\lambda = 2,2$ мм), практически недоступной для существующих аналогов. Терагерцевая область, соответствующая частотам порядка 1 ТГц, является очень неудобной, а часто и вовсе недоступной для проведения измерений с помощью стандартных спектроскопических методик. Здесь оказываются непригодными отработанные методы соседних (по отношению к терагерцевому) СВЧ- и ИК-диапазонов [9, 10]. Поэтому в настоящее время в литературе практически отсутствуют надежные количественные экспериментальные данные по оптическим свойствам материалов в диапазоне $\sim 0,1 \dots 20$ ТГц. При этом особенно труднодоступным является субтерагерцевый диапазон ($f < 1$ ТГц). Это обстоятельство стимулирует работу по совершенствованию известных и созданию новых электроскопических методов с целью освоения терагерцевой и субтерагерцевой областей [7].

Представленный вариант терагерцевого эллипсометра рассчитан на работу на длине волны $\lambda = 2,2$ мм. Такая большая длина волны позволяет производить масштабное моделирование влияния различных поверхностных структур (как идеальных, так и дефектных) на эллипсометрические параметры материалов. Представлены примеры систематических исследований масштабного моделирования влияния различных дефектов на поверхности феррита (по оптическим параметрам – аналог функциональных металлов) – материала с сильным поглощением на данные терагерцевой эллипсометрии.

рам – аналог функциональных металлов) – материала с сильным поглощением на данные терагерцевой эллипсометрии.

1. Экспериментальная методика и образцы. Терагерцевый нуль-эллипсометр. Терагерцевый эллипсометр построен по схеме PCSA (Polarizer – Compensator – Sample – Analyzer) и реализует нулевую схему измерений в автоматизированном режиме с использованием специально разработанных аппаратных и программных средств. Выбор такой схемы эллипсометра обусловлен возможностью достижения наилучших метрологических характеристик, а наличие компенсатора позволяет исследовать не только поглощающие образцы, но и прозрачные [1].

Терагерцевый нуль-эллипсометр создан на основе квазиоптической линии передачи – полого диэлектрического лучевода и комплекса квазиоптических устройств и компонентов для диапазона частот 0,1...1 ТГц, разработанных в Институте радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины [9, 10], где реализован широкий комплекс квазиоптических лучеводных приборов и функциональных компонентов терагерцевого диапазона, которые могут комбинироваться различным образом для целенаправленного построения радиоизмерительных схем различного назначения.

Квазиоптический тракт эллипсометра позволяет без каких-либо схемных и конструктивных изменений обеспечивать работу в широком диапазоне частот 0,1...1 ТГц при замене генератора и детектора. Кроме того, элементная база позволяет реализовать любую другую эллипсометрическую схему измерений. Созданный эллипсометр реализует нулевую четырехзонную методику измерений, что обеспечивает максимальную точность [1].

На рис. 2 показана квазиоптическая схема терагерцевого нуль-эллипсометра.

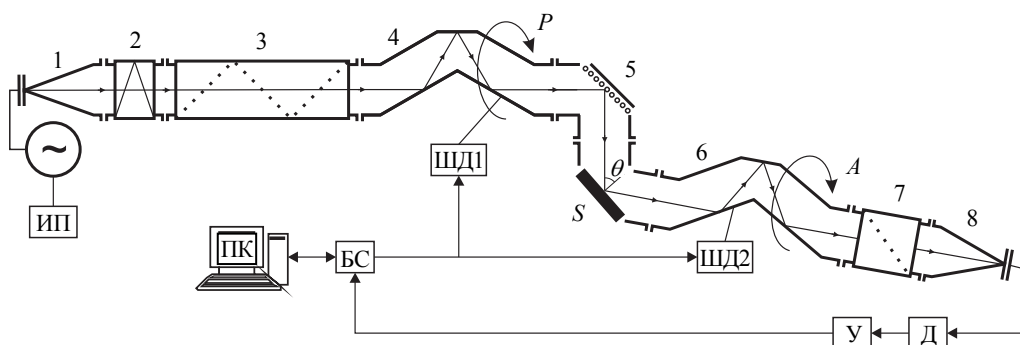


Рис. 2. Квазиоптическая схема терагерцевого нуль-эллипсометра

Сигнал от генератора (ИП) выводится через стандартный волновод и передается в квазиоптический лучеводный тракт посредством волно-

водно-лучеводного перехода 1. Сигнал модулируется механическим амплитудным модулятором 2. Аттенюатор 3 выполняет в схеме функци-

ного поляризатора, а также позволяет регулировать амплитуду сигнала. Вращатель 4 поворачивает плоскость поляризации на произвольный угол P . Таким образом, в данной схеме функцию поляризатора с варьируемым азимутом выполняет пара элементов: собственно линейный поляризатор (как часть аттенюатора) и вращатель поляризации. Далее компенсатор 5 преобразует излучение в эллиптически поляризованное, вводя сдвиг фазы 90° между ортогонально поляризованными компонентами. Измерительная ячейка, включающая в себя гониометр с держателем образца, обеспечивает необходимый угол θ падения излучения на установленный в ней исследуемый объект S . Функцию анализатора выполняет пара элементов: вращатель плоскости поляризации 6, определяющий азимут анализатора A , и собственно анализатор 7. Такое устройство анализатора связано с поляризационной чувствительностью детектора излучения (Д), в качестве которого используется диод Шоттки. После детектора сигнал усиливается и демодулируется селективным усилителем (У), затем через блок сопряжения (БС) поступает в компьютер (ПК).

Все вращающиеся элементы оснащены шаговыми двигателями (ШД1 и ШД2) типа ДШИ-200-1, которые управляются ПК через специальный интерфейс (БС). Поиск положения гашения в четырех измерительных зонах выполняется автоматически.

Система управления эллипсометром состоит из аппаратной и программной частей. БС состоит из двух модулей: АЦП и модуля управления шаговыми двигателями (аппаратная

часть). Для оцифровки сигнала после усилителя используется 16-битный АЦП с частотой дискретизации 100 кГц. Блок сопряжения с двигателями состоит из блока питания и контроллеров управления, которые поддерживают микрошаговый режим работы шаговых двигателей, что обеспечивает минимальный шаг поворота вала $\sim 0,02^\circ$ и дает шаг позиционирования поляризатора и анализатора $\sim 0,01^\circ$. Для управления эллипсометром разработано специальное алгоритмическое и программное обеспечение.

Для тестирования эллипсометра был использован ряд образцов хорошо изученных материалов, оптические константы которых в субтерагерцевом диапазоне частот приведены в справочной литературе (тефлон (фторопласт-4), полистирен (полистирол), плексиглас, и эбонит). Поскольку коэффициент поглощения этих материалов $k < 10^{-3} \ll n$, в нашем случае его можно положить равным нулю. Кроме того, был исследован непрозрачный в этой области феррит марки *Epcos* № 87, для которого справочных данных нет. Для этих материалов измерялись угловые зависимости Ψ и Δ , на основе которых в модели чистой поверхности рассчитывались оптические константы – показатель преломления $n_{\text{элл}}$ и коэффициент поглощения $k_{\text{элл}}$. Результаты измерений на частоте 0,14 ТГц ($\lambda = 2,2$ мм) представлены в таблице, где для сравнения приведены соответствующие справочные данные ($n_{\text{спр}}$) [11, 12]. Из таблицы видно, что $n_{\text{элл}}$ и $n_{\text{спр}}$ совпадают с точностью $\sim 1,5\%$.

Результаты тестирования терагерцевого нуль-эллипсометра ($\lambda = 2,2$ мм)

Материал	$n_{\text{элл}}$	$n_{\text{спр}}$ [10, 11]	$k_{\text{элл}}$	$R_{\text{элл}}$	$R_{\text{рефл}}$
Тефлон (Фторопласт-4)	1,42	1,43	0	3	3
Плексиглас	1,56	1,60	0	5	7
Полистирен (полистирол)	1,57	1,59	0	5	5
Эбонит	1,69	1,67	0	7	9
Феррит <i>Epcos</i> № 87	6,20	–	4	63	62

Из полученных значений $n_{\text{элл}}$ и $k_{\text{элл}}$ был рассчитан энергетический коэффициент нормального отражения $R_{\text{элл}}$ [2]:

$$R_{\text{элл}} = \frac{(n_{\text{элл}} - 1)^2 + k_{\text{элл}}^2}{(n_{\text{элл}} + 1)^2 + k_{\text{элл}}^2}. \quad (2)$$

Эти результаты также представлены в таблице, где в целях дополнительного контроля достоверности полученных данных приведены соответствующие значения коэффициента отражения $R_{\text{рефл}}$ измеренного независимо на рефлектометре для тех же образцов и на той же длине волны. Поскольку эллипсометрические и рефлектомет-

рические данные полностью независимы, совпадение $R_{\text{элл}}$ и $R_{\text{рефл}}$ с точностью до $\sim 1\%$ также подтверждают достоверность значений оптических констант, полученных с помощью эллипсометра.

Проведено исследование повторяемости и стабильности получаемых результатов, для чего одни и те же образцы измерялись многократно при разной температуре окружающей среды, после полной разборки/сборки установки, при разных направлениях вращения поляризующих элементов и т. д. Всего было проделано около 20 экспериментов, статистический анализ которых показал, что даже при таких жестких усло-

виях тестирования разброс результатов не превосходит $0,05^\circ$ и $0,1^\circ$ для Ψ и Δ соответственно.

Разработанный терагерцевый нуль-эллипсомер обладает рядом преимуществ: простота и надежность конструкции, относительно низкая стоимость, удобство в эксплуатации, которые удалось получить благодаря использованию квазиоптической лучеводной элементной базы.

Модельные образцы. Материалом образцов для исследования в настоящей работе служил феррит марки *Ercos* № 87. Выбор материала связан с тем, что его оптические свойства (см. таблицу) в рабочем терагерцевом спектральном диапазоне близки свойствам металлов в оптическом диапазоне.

Образцы представляли собой пластины размером 50×22 мм² (при диаметре пучка 20 мм). В центре пластины располагался дефект в виде параллелепипеда с варьируемыми параметрами a , b , d (рис. 3).

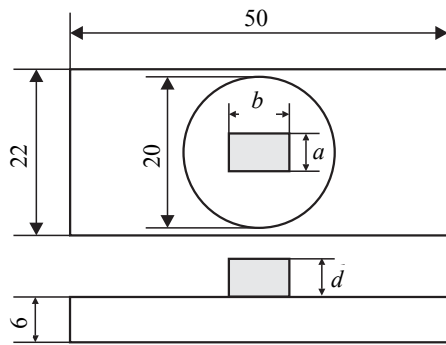


Рис. 3. Схематическое изображение образца для исследования с варьируемыми размерами a , b и d

2. Экспериментальные результаты. На рис. 4–6 представлены результаты систематических исследований влияния различных дефектов на поверхности материала с сильным поглощением по данным терагерцевой эллипсометрии. Приведены зависимости эллипсометрических параметров Ψ и Δ от угла падения зондирующего излучения.

Размеры дефекта даны в формате $a \times b \times d$ мм³ (рис. 3). Длина волны зондирующего излучения – $\lambda = 2,14$ мм (0,14 ТГц). Каждая кривая получена для образца с дефектом, имеющим определенные геометрические размеры a , b и d .

На рис. 4 толщины дефектов $d = 4$ мм одинаковы для серий кривых на каждом рисунке, изменялись только размеры a и b . Из рис. 4 очевидно, что влияние локализованных дефектов, размер которых превосходит длину волны в несколько раз, на эллипсометрические параметры Ψ и Δ значительно и нетривиально: наличие на поверхности прямоугольного дефекта размером

$9 \times 5 \times 4$ мм³ или $5 \times 9 \times 4$ мм³ приводит к качественному изменению характера угловых зависимостей $\Psi(\theta)$ и $\Delta(\theta)$ по сравнению с чистой поверхностью и $5 \times 5 \times 4$ мм³, которые в этом случае имеют не классический вид. Зависимость $\Psi(\theta)$ не имеет в этом случае минимума, а $\Delta(\theta)$ становится существенно немонотонной (см. рис. 4). Такой характер «неклассичности» наблюдался нами ранее для образцов меди с локализованными дефектами при их исследовании методами оптической эллипсометрии (рис. 1) [5, 6].

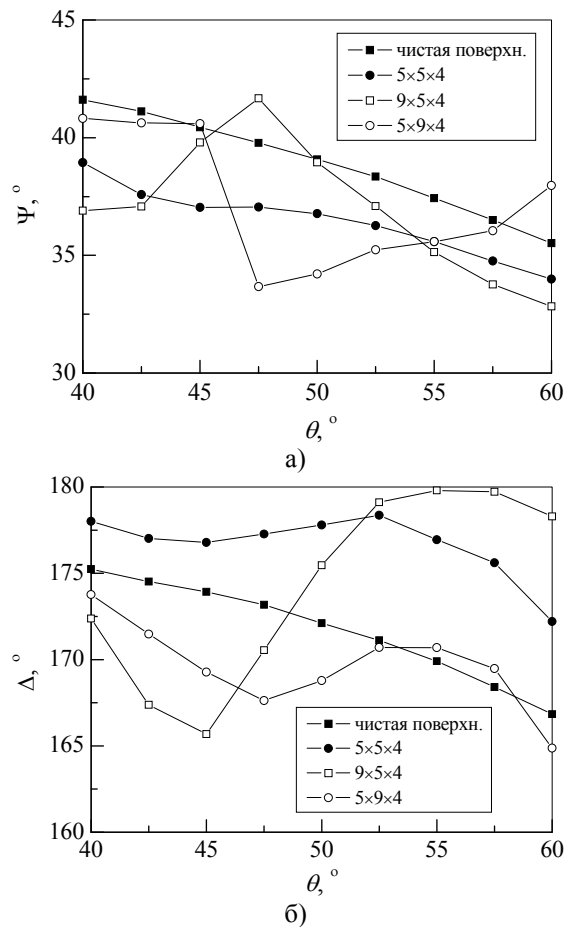


Рис. 4. Угловые зависимости эллипсометрических параметров Ψ и Δ для чистой поверхности феррита и для поверхности с дефектами разных размеров, но одинаковой толщины

Таким образом, получено подтверждение модели, предложенной в работах [5, 6], согласно которой обнаруженный в них «неклассический» ход угловых зависимостей $\Psi(\theta)$ и $\Delta(\theta)$ может быть связан с наличием локализованных дефектов, размер которых в несколько раз превосходит длину волны зондирующего излучения.

Как видно из рис. 4, влияние подобных дефектов не только значительно, но и нетривиально. Например, поворот $9 \times 5 \times 4$ мм³ на 90° ($5 \times 9 \times 4$ мм³) в плоскости образца качественно

меняет ход зависимостей $\Psi(\theta)$ и $\Delta(\theta)$, причем, как показали эксперименты, характер изменений будет иным для других линейных размеров дефекта. Более того, оказывается, что ориентация дефекта может оказывать большее влияние, чем изменение его размеров.

При этом, несмотря на сильное качественное влияние дефекта на ход зависимостей $\Psi(\theta)$ и $\Delta(\theta)$, они количественно остаются близкими к соответствующим зависимостям для чистой поверхности либо даже осциллируют относительно них. Это дало основание предположить, что при уменьшении дефекта, начиная с некоторого конечного размера, он может перестать быть «видимым» для эллипсометрии. Для уменьшения количества параметров на данном этапе исследовался квадратный образец $5 \times 5 \text{ мм}^2$, толщина которого постепенно уменьшалась (4; 2,5; 1,4 мм). Зависимости $\Psi(\theta)$ и $\Delta(\theta)$ для некоторых значений толщины образца приведены на рис. 5.

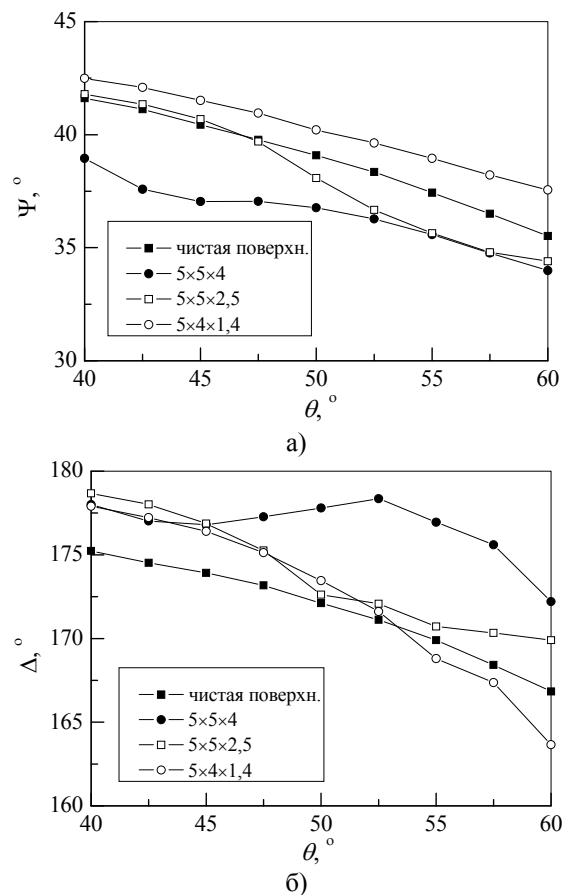


Рис. 5. Угловые зависимости эллипсометрических параметров Ψ и Δ для чистой поверхности феррита и для поверхности с дефектами одинаковых размеров, но разной толщины

Видно, что несмотря на «непредсказуемый» характер изменения хода кривых, они в среднем приближаются к чистой поверхности. Так, уже при толщине 1,4 мм кривые становятся

качественно «традиционными», а по абсолютным значениям близкими к чистой поверхности.

На рис. 6 показаны результаты дальнейшего уменьшения толщины дефекта. В связи со сложностями механической обработки феррита не удалось получить образец $5 \times 5 \text{ мм}^2$ с толщиной меньше 1,4 мм, поэтому более тонкие дефекты имели меньшие размеры также и в плоскости образца. Из рис. 6 видно, что дальнейшее уменьшение дефекта приводит к равномерному приближению зависимостей $\Psi(\theta)$ и $\Delta(\theta)$ к чистой поверхности. Более того, дефект с характерными размерами $1,5 \times 1 \times 0,4 \text{ мм}^3$ (но неправильной формы) дал отклонение от чистой поверхности на доли градуса во всем диапазоне углов, что уже близко к точности эллипсометра.

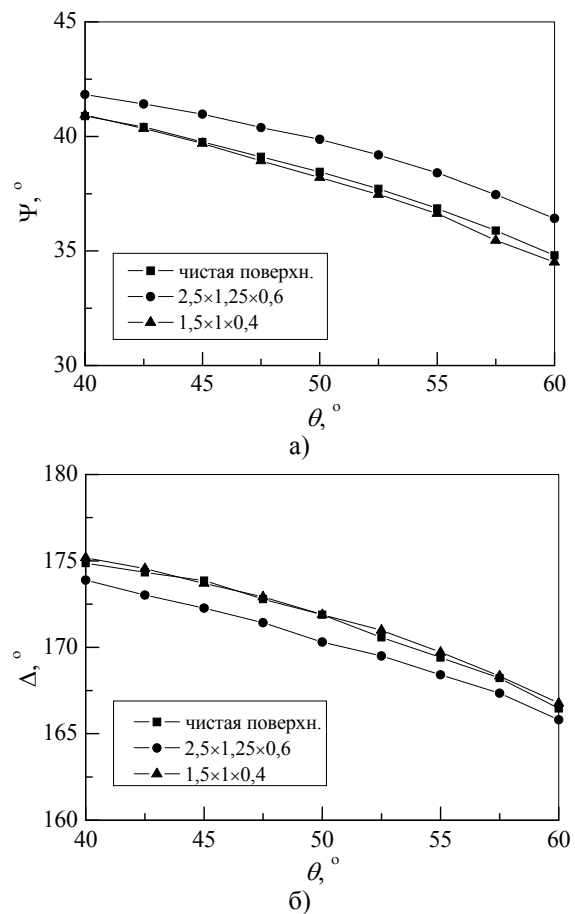


Рис. 6. Пример нечувствительности эллипсометрических параметров к наличию на поверхности локализованного дефекта, размер которого сравним с длиной волны зондирующего излучения

С другой стороны, дефект $1,5 \times 1 \times 0,4 \text{ мм}^3$ все еще сравним по размерам с длиной волны зондирующего излучения, поэтому было проведено прямое измерение коэффициента отражения данного образца. Оказалось, что коэффициент отражения R для него составил 57 %, что на 6 % меньше, чем 63 % у исходного образца (см. таб-

лицу). При этом коэффициент отражения, рассчитанный по данным эллипсометрии, составил 62,5 %, что практически совпадает с отражением образца без дефектов.

Таким образом, получено подтверждение модели, предложенной в работах [3, 4], согласно которой локализованные дефекты, размеры которых несколько меньше длины волны зондирующего излучения, становятся «невидимыми» для эллипсометрии, хотя из-за рассеяния по-прежнему влияют на результаты рефлектометрии.

Выводы. Создан автоматизированный квазиоптический терагерцевый нуль-эллипсометр для исследования материалов на частоте 0,14 ТГц ($\lambda = 2,2$ мм). Квазиоптический тракт эллипсометра, выполненный на основе полого диэлектрического лучевода и лучеводных компонентов, позволяет при замене генератора и приемника без принципиальных схемных и конструктивных изменений обеспечивать работу в широком диапазоне частот 0,1...1 ТГц. Эллипсометр построен по схеме *PCSA* и реализует нулевую четырехзонную методику измерений, что обеспечивает максимальную точность. Представлены данные масштабного физического моделирования эллипсометрических параметров, полученных с помощью субтерагерцевого квазиоптического эллипсометра в миллиметровом диапазоне радиоволн, существенно дополняющие и объясняющие данные систематических исследований влияния различных оптических дефектов на поверхности материала с сильным поглощением. Установлено, что квазиоптическая эллипсометрия однозначно отслеживает изменения в топографии поверхности. Показано, что такая большая длина волны ($\lambda = 2,2$ мм) позволяет производить масштабное моделирование влияния различных поверхностных дефектов на эллипсометрические параметры материалов (на миллиметровом уровне). Получено подтверждение модели, предложенной в работах [3, 4], согласно которой локализованные дефекты, размеры которых несколько меньше длины волны зондирующего излучения, становятся «невидимыми» для эллипсометрии, хотя сильно влияют на коэффициент зеркального отражения. Модель, предложенная в работах [5, 6], согласно которой обнаруженный в них «неклассический» ход угловых зависимостей $\Psi(\theta)$ и $\Delta(\theta)$ может быть связан с наличием локализованных дефектов, размер которых в несколько раз превосходит длину волны зондирующего излучения, также получила однозначное подтверждение.

Библиографический список

1. *Fujiwara H.* Spectroscopic ellipsometry: principles & applications / H. Fujiwara. – Chichester: John Wiley & Sons, 2007. – 369 p.

2. *Ohlidal I.* Ellipsometry of thin films / I. Ohlidal, D. Franta // Progress in Optics. – Amsterdam: Elsevier, 2000. – Vol. 41. – P. 181–282.

3. *Optical characteristics of recrystallized tungsten mirrors exposed to low-energy, high flux D plasmas* / A. I. Belyaeva, V. Kh. Alimov, A. A. Galuza et al. // J. of Nuclear Materials. – 2011. – 413, N 1. – P. 5–10.

4. *Modification of optical properties of recrystallized tungsten due to the change in surface morphology induced by deuterium ion bombardment* / A. I. Belyaeva, A. A. Galuza, A. A. Savchenko, K. A. Slatin // Bulletin of the Russian Academy of Science. Physics. – 2011. – 75, N 5. – P. 721–724.

5. *Влияние размера зерна на стойкость к ионному распылению зеркал из низколегированного медного сплава системы Cu-Cr-Zr* / А. И. Беляева, А. А. Галуза, И. В. Колонов и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. – 2011. – № 4. – С. 50–59.

6. *Optical characteristics of light Cr-Zr copper alloys bombarded by ions of deuterium plasma* / A. I. Belyaeva, A. A. Galuza, I. V. Kolenov et al. // Bulletin of the Russian Academy of Science. Physics. – 2012. – 76, N 7. – P. 724–767.

7. *Методы терагерцевой-субтерагерцевой ЛЮВ-спектроскопии проводящих материалов* / Б. П. Горшунов, А. А. Волков, А. С. Прохоров, И. Е. Спектор // Физика твердого тела. – 2008. – 5, № 11. – С. 1921–1932.

8. *Конев В. А.* Радиоволновая эллипсометрия / В. А. Конев, Е. М. Кулешов, Н. Н. Пунько; под ред. И. С. Ковалева. – Минск: Наука и техн., 1985. – 104 с.

9. *Радиоэлектроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн* / под ред. А. Я. Усикова. – К.: Наук. думка, 1986. – С. 140–157.

10. *Квазиоптические антенно-фидерные системы* / В. К. Киселев, А. А. Костенко, Г. И. Хлопов, М. С. Яновский; под ред. Г. И. Хлопова. – Х.: ИПП «Контраст», 2013. – 408 с.

11. *Goldsmith P. F.* Quasioptical systems: Gaussian beam quasioptical propagation and applications / P. F. Goldsmith. – N. Y.: IEEE Press, 1998. – 412 p.

12. *Мериакри В. В.* Диэлектрическая спектроскопия миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн и ее применения / В. В. Мериакри // Радиотехника. – 2005. – № 8. – С. 97–102.

Рукопись поступила 28.10.2013.

A. I. Belyaeva, A. A. Galuza, V. K. Kiseliov,
I. V. Kolenov, A. A. Savchenko, E.M. Kuleshov,
S. Y. Serebriansky

QUASIOPTICAL SCALE MODELING OF METAL SURFACE LOCALIZED DEFECTS INFLUENCE ON OPTICAL ELLIPSOMETRY DATA

Ellipsometry is a highly sensitive, non-contact, non-destructive method for studying surfaces and interphase boundaries, based on the study of changes in the polarization state of the probe electromagnetic wave as a result of its interaction with the boundary between the media. A special problem in the analysis of the ellipsometric data are surface defects, which include roughness, island films, regular relief, some localized defects. To date, there are no adequate models describing the effect of localized surface defects on results of ellipsometrical experiments. Previously, it has been suggested that localized defects under certain conditions may not affect the ellipsometric data. The purpose of this work is to test this hypothesis by conducting systematic studies of the influence of defects in the form of parallelepipeds of various sizes on the ellipsometric data. Scale modeling of influence of defects typical for surface subjected to radiation sputtering on ellipsometric experiment results in the optical range has been performed using developed terahertz ellipsometer that operates at wavelength $\lambda = 2.2$ mm (0.14 THz). Such

a large operating wavelength allowed to form on the surface defects of a given shape and size and to investigate their impact on the ellipsometric parameters. A description of the ellipsometer, and the results of systematic studies of the influence of various defects on the surface of the material with strong absorption data ellipsometry are presented. It is first experimentally proved that localized defects of comparable size to the wavelength can be "invisible" for ellipsometry.

Key words: ellipsometry, terahertz ellipsometer, scale modeling, localized defects.

А. І. Беляєва, А. А. Галуза, В. К. Кисельов,
І. В. Коленов, А. А. Савченко, Е. М. Кулешов,
С. Ю. Серебрянський

КВАЗІОПТИЧНЕ МАСШТАБНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ЛОКАЛІЗОВАНИХ ДЕФЕКТІВ ПОВЕРХНІ МЕТАЛІВ НА ДАНІ ОПТИЧНОЇ ЕЛІПСОМЕТРІЇ

Еліпсометрія – високочутливий, безконтактний, неруйнівний метод дослідження поверхонь і міжфазних меж, що ґрунтується на вивченні зміни стану поляризації зондуєної електромагнітної хвилі в результаті її взаємодії з межею роз-

ділу. Особлива проблема при аналізі еліпсометричних даних полягає в дефектах поверхні, до яких можна віднести шорсткість, острівкові півки, регулярний рельєф, окремі локалізовані дефекти. На сьогодні не існує адекватних моделей, що описують вплив локалізованих дефектів поверхні на результати еліпсометричних експериментів. Раніше було висунуто припущення, що локалізовані дефекти за певних умов можуть не впливати на еліпсометричні дані. Метою роботи є перевірка цієї гіпотези систематичними дослідженнями впливу дефектів у формі паралелепіпедів різних розмірів на еліпсометричні дані. За допомогою побудованого терагерцового еліпсометра, що працює на довжині хвилі $\lambda = 2,2$ мм (0,14 ТГц), проведено масштабне моделювання впливу дефектів, характерних для поверхні, що зазнала впливу радіаційного розпорощення, на результати еліпсометричного експерименту в оптичному діапазоні. Настільки велика робоча довжина хвилі дозволяє формувати на поверхні дефекти заданої форми й розмірів і дослідити їх вплив на еліпсометричні параметри. Наведено опис еліпсометра, а також результати систематичних досліджень впливу різних дефектів на поверхні матеріалу з сильним поглинанням на дані еліпсометрії. Уперше експериментально доведено, що локалізовані дефекти, порівняні за розміром з довжиною хвилі, можуть бути «невидимими» для еліпсометричної методики.

Ключові слова: еліпсометрія, терагерцовий еліпсометр, масштабне моделювання, локалізовані дефекти.