

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И АППАРАТУРА
ДЛЯ ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

УДК 535.511

Е. В. Спесивцев, С. В. Рыхлицкий*(Новосибирск)***ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ ВЫСОКОГО
ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ**

Проведен анализ основных направлений развития эллипсометрии высокого пространственного разрешения. Показано преимущество зондовых эллипсометрических систем при измерении контрастных микрообъектов с резко выраженными границами. Установлены и экспериментально исследованы основные факторы, влияющие на точность измерений. Приведены рекомендации по созданию эллипсометрической аппаратуры для локальных измерений.

Теория и техника классической эллипсометрии, работающей со сравнительно однородными объектами с использованием параллельных световых пучков, в настоящее время достаточно развиты, и метод эллипсометрии широко используется в различных областях науки и техники [1].

В то же время в связи с тенденцией постоянной микроминиатюризации параметров изделий в микроэлектронике, необходимостью проведения прецизионных измерений биологических, химических и других объектов, а также для обеспечения качественного контроля различных технологических процессов особую актуальность приобретает проблема осуществления эллипсометрических измерений неоднородных объектов с высоким пространственным разрешением.

Данная проблема в настоящее время решается двумя путями.

Первое направление развивается по пути использования многоэлементных (матричных) фотоприемных устройств и представляет собой обзорную эллипсометрическую систему с электронным сканированием по поверхности образца. Анализ данного направления можно провести на примере работы [2], где описана эллипсометрическая система с ПЗС-матрицей, имеющей 480×512 элементов. Авторы использовали фотометрическую систему эллипсометрических измерений с вращающимся анализатором. Изображение каждого отдельного участка измеряемого образца переносилось объективом анализирующего канала установки на соответствующий фоточувствительный элемент матрицы фотоприемников, после чего одновременно проводились измерения эллипсометрических параметров Ψ и Δ для всего поля зрения. В результате измерений была получена топограмма распределения эллипсометрических параметров по поверхности образца. Случайная составляющая погрешности измерений не превышала $0,36^\circ$ для Δ и $0,082^\circ$ для Ψ . Пространственное разрешение такой системы определялось в первую очередь увеличением анализирующего объектива и размерами элемента матрицы фотоприемников и, по оценке авторов, составляло порядка 10 мкм. Следует отметить, что в этом случае размеры линейного поля зрения в плоскости предметов не превышали $4,8 \times 5,12$ мм, т. е. описанная система достаточно узкопольная. Для

увеличения поля обзора подобных систем необходимо увеличивать в десятки раз количество фоточувствительных элементов в матрице, что технически трудно осуществимо и приведет к значительному удорожанию системы, либо уменьшать увеличение изображающего объектива, что повлечет за собой ухудшение пространственного разрешения. Также следует отметить, что использование подобных систем для измерения групп локальных микрообъектов с резко выраженными границами существенно ограничено в связи с тем, что дифракционные явления на границах микрообъектов влияют на точность эллипсометрических измерений.

Таким образом, первое направление развития эллипсометрических систем высокого пространственного разрешения может быть, действительно, эффективно использовано лишь при анализе относительно малоразмерных и сравнительно однородных объектов без резко выраженных границ.

Второе направление основано на фокусировке светового пучка непосредственно на измеряемом микрообъекте и представляет собой зондовую эллипсометрическую систему в совокупности с электромеханическим сканированием поверхности образца для увеличения поля обзора.

В работе [3] описан эллипсометр, где свет фокусируется на образец объективом зондирующего канала и принимается через объектив анализирующего канала прибора.

Анализ влияния сходимости пучка на измерения эллипсометрических параметров наиболее подробно осуществлен в работе [4], где авторами предложено понятие обобщенных поляризационных углов и получены формулы для их вычисления. Показано, что в случае использования двух объективов (фокусирующего и приемного), возникают значительные (до единиц градусов) ошибки измерений параметров Ψ и Δ , вызванные их сильной зависимостью от угла падения света на поверхность образца. Это обусловлено тем, что каждый единичный световой параллельный пучок, на множество которых может быть разбит конусообразный сходящийся пучок света, имеет собственный угол падения φ_i и, следовательно, собственные значения параметров Ψ_i и Δ_i .

В связи с этим подобные системы могут удовлетворительно работать лишь в слабосходящихся (до 3°) пучках и, следовательно, не обладают высоким пространственным разрешением. С целью устранения указанного недостатка в работе [5] впервые предложено использовать только один фокусирующий объектив, а анализ сферического волнового фронта, отраженного от образца, проводить лишь в узком осевом телесном угле.

Экспериментальные исследования, проведенные на статическом нуль-эллипсометре, показали перспективность данного направления. Было установлено, что при таком подходе может быть достигнута высокая точность измерений, так как анализируемый световой пучок обладает малой расходимостью, и результаты измерений можно интерпретировать с привлечением математического аппарата классической эллипсометрии параллельных пучков.

Рассмотрим основные факторы, влияющие на точность проведения эллипсометрических измерений микрообъектов с резко выраженными границами для случая использования одного фокусирующего объектива в зондирующем канале эллипсометра.

Было установлено, что основным источником возникновения дополнительных инструментальных погрешностей в данной схеме измерений является микрообъектив. Использование микрообъектива приводит к деполаризации проходящего через него излучения и к искажению падающего на образец волнового фронта. Деполаризация излучения обусловлена остаточным двулучепреломлением линз микрообъектива и устраняется путем использования высококачественных оптических материалов. Искажение падающего волнового фронта приводит к тому, что анализируется излучение, отраженное не только от самого микрообъекта, но и от граничащих с ним поверхностей.

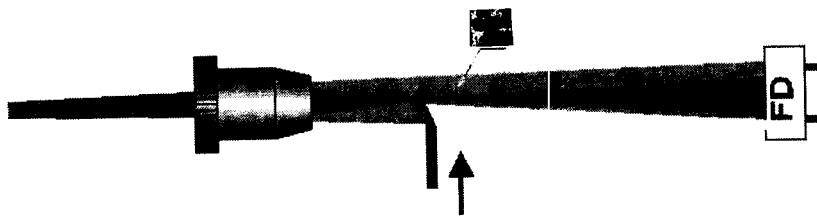


Рис. 1. Схема измерения распределения мощности лазерного излучения в пятне, сфокусированном микрообъективом

где ω — размер перетяжки сфокусированного излучения лазера или пятна моды, на границе которого мощность излучения падает в e^2 раз; r — радиус пятна, за пределами которого энергия излучения равна F .

Для оценки качества серийного поляризационного микрообъектива ОМ-2П были проведены измерения реального распределения мощности излучения лазера в сфокусированном пятне. В ходе эксперимента лазерный пучок перекрывался сканирующим ножом в поперечном направлении вблизи фокуса микрообъектива в месте перетяжки лазерного пучка. При этом интенсивность проходящего излучения измерялась фотоприемником FD (рис. 1). Результаты этого эксперимента отражены на рис. 2, где кривая 2 — измеренное распределение интенсивности излучения в пятне. Здесь же экспериментальные данные для сравнения сопоставлены с теоретическим распределением (1) (кривая 1). В самом деле, реальная доля энергии излучения за пределами пятна радиусом $r = 2\omega$ составила 1–2 %, тогда как теоретически она не должна превышать 0,03 %.

Такое высокое значение фонового излучения обусловлено диффузным рассеянием света на линзах микрообъектива (F , на рис. 1). Поэтому чистота и качество изготовления полированных поверхностей линз в данном случае приобретают первостепенное значение.

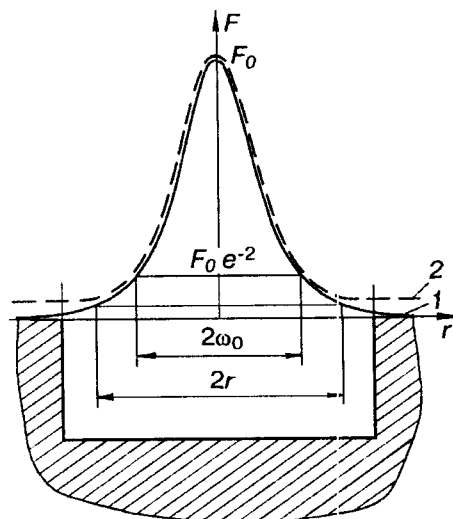


Рис. 2. Теоретическое (кривая 1) и экспериментально измеренное (кривая 2) распределения мощности сфокусированного лазерного излучения в пятне

Произведем оценку величины ошибки измерения эллипсометрических параметров с учетом доли энергии, распределенной за пределами измеряемого локального объекта. Если принять долю энергии излучения, приходящуюся на площадь поверхности измеряемого объекта, равной E_1/E_0 , а долю излучения, приходящуюся на соседнюю область, — E_2/E_0 , то общее уравнение эллипсометрии можно представить следующим образом:

$$\rho = \operatorname{tg}\Psi e^{i\Delta} = \frac{\frac{E_1}{E_0} R_{p1} + \frac{E_2}{E_0} R_{p2} e^{-i2\beta}}{\frac{E_1}{E_0} R_{s1} + \frac{E_2}{E_0} R_{s2} e^{-i2\beta}}, \quad (2)$$

где R_{p1} , R_{s1} и R_{p2} , R_{s2} — амплитудные френелевские коэффициенты отражения поверхности измеряемого локального объекта и соседней с измеряемым объектом поверхности соответственно; β — фазовый сдвиг, возникающий в случае, если переход между измеряемой и сопряженной поверхностью носит ступенчатый характер (в этом случае $\beta = -2\pi h \cdot \cos\varphi/\lambda$, где h — высота ступеньки; φ — угол падения света; λ — длина волны света).

Решая уравнение (2) относительно известных физических параметров поверхности измеряемого локального объекта, а также соседней поверхности, можно оценить степень влияния доли излучения E_2/E_0 на измерения эллипсометрических параметров Ψ и Δ . Из выражения (2) хорошо видно, что в измеренные значения эллипсометрических параметров вносят вклад как различие поляризационных свойств сопряженных поверхностей (измеряемой и соседней), так и высота ступеньки h при резком переходе на границе, причём первый фактор превалирует. Так, в случае если поляризационные свойства основной и соседней поверхностей абсолютно идентичны, даже наличие переходной ступеньки не приведет к какому-либо серьезному влиянию фонового излучения. Напротив, при отсутствии ступенчатого перехода, если сопряженные поверхности обладают различными поляризационными свойствами, влияние засветки сразу становится ощутимым.

Продemonстрируем количественно влияние фоновой засветки приграничной поверхности на измерения эллипсометрических параметров локальных объектов. Для расчета возьмем модель: пленка SiO_2 на Si . Предполагаемый объект измерения представлял собой окно, вытравленное в слое окисла. Толщина пленки основного окисла составляла 1200 \AA . Расчеты проведены для трех толщин вытравленного окисла: 10 , 500 и 1000 \AA . При этом долю засветки, соседней с измеряемым объектом поверхности E_2/E_0 для каждой толщины остаточного окисла, примем $1 \cdot 10^{-2}$, $1 \cdot 10^{-3}$, $5 \cdot 10^{-4}$. Результаты модельных расчетов представлены в таблице.

Из таблицы видно, что ошибки $\delta\Psi$, $\delta\Delta$ растут пропорционально увеличению доли фонового излучения. Зависимость их величины от соотношения поляризационных свойств измеряемой и соседней поверхностей носит более сложный характер и в каждом отдельном случае индивидуальна. В нашем конкретном примере величина ошибки $\delta\Delta$ растет с увеличением раз-

Толщина остаточного окисла, \AA	Эллипсометрические ошибки измерений $\delta\Psi$, $\delta\Delta$, град		
	$E_2/E_0 = 1 \cdot 10^{-2}$	$E_2/E_0 = 1 \cdot 10^{-3}$	$E_2/E_0 = 5 \cdot 10^{-4}$
10	$\delta\Psi = -0,18$ $\delta\Delta = -1,7$	$\delta\Psi = -0,02$ $\delta\Delta = -0,17$	$\delta\Psi = -0,01$ $\delta\Delta = -0,08$
500	$\delta\Psi = -0,19$ $\delta\Delta = -0,4$	$\delta\Psi = 0,02$ $\delta\Delta = -0,04$	$\delta\Psi = 0,01$ $\delta\Delta = 0,02$
1000	$\delta\Psi = 0,13$ $\delta\Delta = -0,006$	$\delta\Psi = 0,013$ $\delta\Delta = 0$	$\delta\Psi = 0,005$ $\delta\Delta = 0$

ности толщин основного и вытравленного окислов, при этом ошибка $\delta\Psi$ практически не меняется.

В заключение можно сформулировать следующие рекомендации, которые полезно учитывать при создании эллипсометрической аппаратуры высокого пространственного разрешения для контроля параметров поверхности контррастных микрообъектов с резко выраженными границами:

— наиболее оптимально использовать схему фокусировки зондирующего излучения эллипсометра непосредственно на поверхности измеряемого объекта с последующим анализом изменения состояния поляризации света в узком квазипараллельном пучке, диафрагмированном из отраженной сферической волны;

— конструкция фокусирующего микрообъектива должна обеспечивать минимальный уровень деполаризованного и рассеянного излучений;

— конструкция микрообъектива должна способствовать оптимальному соотношению между его увеличением и достаточным размером вершинного отрезка;

— измерительная схема эллипсометра должна обеспечивать высокую чувствительность измерения слабых сигналов;

— измерительная схема эллипсометра должна быть слабочувствительной к деполаризованному излучению;

— для измерения крупноразмерных образцов наиболее оптимально использовать сочетание микронзондового эллипсометра в совокупности с прецизионной электромеханической системой сканирования образца по площади.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Spectroscopic Ellipsometry: Proc. of the 1st International Conference on Spectroscopic Ellipsometry, Paris, France, Jan. 11—14, 1993 // Thin Solid Films. 1993. 233, 234.
2. Cohn R. F., Wagner J. W., Kruger J. Dynamic imaging microellipsometry: theory, system design, and feasibility demonstration // Appl. Opt. 1988. 27, N 22. P. 4664.
3. Erman M., Theeten J. B. Spatially resolved ellipsometry // J. Appl. Phys. 1986. 60(3). P. 859.
4. Ржанов А. В., Свиташев К. К., Семенов А. И. и др. Основы эллипсометрии. Новосибирск: Наука, 1978.
5. Слесивцев Е. В., Федорин В. Н. Эллипсометрические исследования поверхности локальных объектов в фокусированном пучке света // Эллипсометрия: теория, методы, приложения. Новосибирск: Наука, 1991. С. 138.
6. Климков Ю. М. Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами. М.: Сов. радио, 1978.

Поступил в редакцию 25 октября 1996 г.