

УДК 535.511

Е. В. Спесивцев, С. В. Рыхлицкий, Н. И. Назаров
(Новосибирск)

АВТОМАТИЧЕСКИЙ СКАНИРУЮЩИЙ МИКРОЭЛЛИПСОМЕТР

Описан автоматический сканирующий микроэллипсометр, разработанный для осуществления измерений параметров поверхностных слоистых структур сложной топологии с большим содержанием локальных микрообъектов с резко выраженными границами. Прибор представляет собой комбинацию высокочувствительного эллипсометра, лазерного микроскопа и прецизионной двухкоординатной сканирующей системы. Приведены результаты измерений.

В настоящее время в эллипсометрии достаточно актуальна проблема измерения микрообъектов с резко выраженными границами [1].

Основные методические вопросы осуществления эллипсометрических измерений таких объектов рассмотрены в [2], где также сформулированы рекомендации по разработке эллипсометрической аппаратуры высокого пространственного разрешения.

В данной статье приводится описание автоматического сканирующего микроэллипсометра, предназначенного для решения указанной проблемы.

В основу принципа работы прибора положена двухканальная балансная схема эллипсометрических измерений [3], формализованное выражение которой можно представить в виде PSA_1/CA_2 , где P — поляризатор; S — измеряемая система; C — компенсатор; A_1 и A_2 — анализаторы.

Оптическая схема эллипсометра изображена на рис. 1. С целью повышения чувствительности и точности измерений (за счет исключения взаимовлияния измерительных каналов в процессе измерения эллипсометрических параметров Ψ и Δ) анализирующий канал эллипсометра разделен на два:

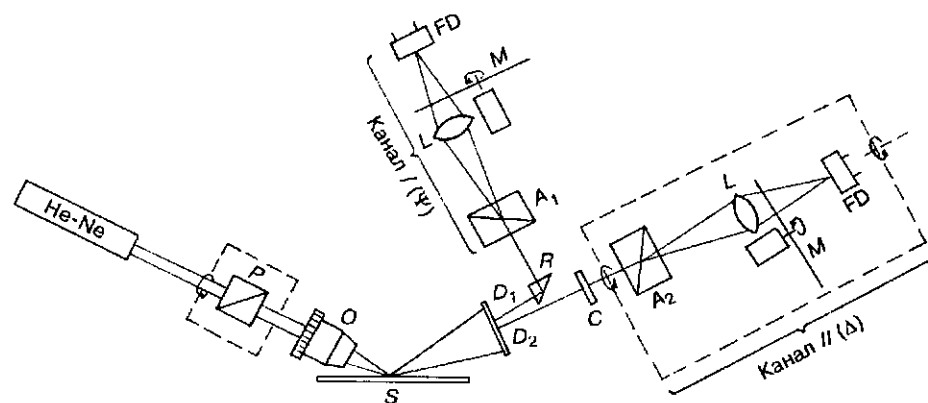


Рис. 1. Оптическая схема эллипсометра «Микроскан»:

P — поляризатор; O — микрообъектив; S — образец; D_1, D_2 — диафрагмы; C — компенсатор; A_1, A_2 — анализаторы; R — поворотная призма; L — линза; M — модулятор; FD — фотоприемник

амплитудный (*I*) и фазовый (*II*). Канал *I* (*PSA*₁) предназначен для измерения параметра Ψ , а канал *II* (*PSCA*₂) — параметра Δ .

Прибор работает следующим образом. Лазерный пучок, линейно поляризованный призмой *P*, фокусируется микрообъективом *O* на поверхности исследуемого образца *S*. Затем из расходящегося пучка диафрагмами *D*₁ и *D*₂ вырезаются два узких пучка света, отраженных от поверхности исследуемого объекта под одинаковыми углами. Вслед за этим световой пучок *D*₁ призмой полного внутреннего отражения *R* направляется в измерительный канал Ψ , а пучок *D*₂ проходит в канал Δ без изменения направления. Оба канала построены по одинаковой схеме за исключением того, что в измерительном канале Δ присутствует компенсатор, в качестве которого использована пластинка $\lambda/4$ из кристаллического кварца с просветленными рабочими поверхностями [4].

В каждом из измерительных каналов падающий световой пучок расщепляется поляризационной призмой Волластога, выполняющей функции анализаторов *A*₁ и *A*₂, на два ортогонально поляризованных пучка. Затем эти пучки модулируются в противофазе механическим модулятором *M*, выполненным в виде диска с прорезями, и собираются линзой *L* в плоскости фотоприемника *FD*. Фотоприемник фиксирует переменный сигнал прямоугольной формы, получающийся в результате разности сигналов двух ортогонально поляризованных пучков света. В приборе компенсатор *C* и призма *A*₁ имеют фиксированные положения. При этом азимутальное положение компенсатора, определяемое относительным поворотом его «быстрой» оси от плоскости падения, равно 45°, а положение главной плоскости пропускания анализатора совпадает с плоскостью падения эллипсометра.

Анализатор *A*₂ совместно с модулятором *M* и фотоприемником *FD* собран в одном азимутальном блоке, который имеет возможность вращения вокруг оси светового пучка на 360°. Вращение азимутального блока осуществляется от шагового привода, а отсчет угловых положений — с помощью цифрового датчика угловых перемещений.

В качестве поляризатора *P* применена поляризационная призма Глана, которая помещена в оправу, вращающуюся аналогично азимутальному блоку.

Процесс измерения заключается в следующем. Требуется найти азимутальное положение поляризатора *P*, которое соответствует условию баланса интенсивностей двух ортогонально поляризованных компонент света, на выходе призмы *A*₁ в измерительном канале Ψ , а также азимутальное положение в состоянии баланса анализатора *A*₂ в измерительном канале Δ . При таких условиях переменные сигналы на фотоприемниках обоих измерительных каналов обращаются в нуль.

Минуя громоздкую процедуру вывода, перейдем к выражениям, связывающим угловые положения поляризатора *P* и анализатора *A*₂, соответствующие условию баланса, с эллипсометрическими параметрами измеряемого образца Ψ и Δ . В канале *PSA*₁, измеряющем параметр Ψ , переменный сигнал на фотоприемнике описывается выражением

$$I_{\Psi}(\omega) = I_0 R_s^2 (\operatorname{tg}^2 \Psi \cdot \cos^2 P - \sin^2 P) \cos^2(\omega t), \quad (1)$$

где *I*₀ — интенсивность рабочего пучка света, падающего на фотоприемник; *R*_s — коэффициент отражения *s*-компоненты света; *P* — угловое положение поляризатора; ω — частота модуляции.

Из формулы (1) видно, что переменный сигнал становится равным нулю при условии

$$\Psi = \pm P. \quad (2)$$

В канале $PSCA_2$, измеряющем параметр Δ , переменный сигнал на фотоприемнике описывается выражением

$$I_{\Delta}(\omega) = I_0 R_s^2 \operatorname{tg} \Psi \cdot \sin 2P \cdot \sin(\Delta + 2A_2) \cos^2(\omega t), \quad (3)$$

где A_2 — азимут анализатора.

Из формулы (3) следует, что сигнал $I_{\Delta}(\omega)$ становится равным нулю при условии

$$\Delta = -2A_2 \pm 2\pi l. \quad (4)$$

Формулы (2) и (4) связывают азимутальные углы поляризатора и анализатора, соответствующие условию баланса, с искомыми эллипсометрическими параметрами образца и являются основными уравнениями, определяющими работу прибора.

Применение в эллипсометре балансной измерительной схемы позволило достичь высокой чувствительности при измерении слабых сигналов, что трудно реализуемо в случае использования фотометрической схемы. Кроме того, классический характер схемы делает процесс измерения и учет инструментальных погрешностей предельно простыми и позволяет достичь высокой абсолютной точности измерений.

Общий вид прибора представлен на рис. 2. В качестве источника света используется высокостабильный He—Ne-лазер с рабочей длиной волны света 632,8 нм. Пространственное разрешение прибора составляет 10 мкм и определяется размером сфокусированного пятна 2ω . Специально разработанные методические и аппаратные приемы борьбы с рассеянным фоновым излучением позволили достичь абсолютной точности измерения эллипсометрических параметров даже для высококонтрастных локальных объектов на уровне $\delta\Psi = 0,08^\circ$, $\delta\Delta = 0,13^\circ$ при средней продолжительности измерения 0,5 с. Для точного наведения зондирующего пятна на измеряемый объект в приборе предусмотрена микропроекционная система, позволяющая одновременно наблюдать лазерное пятно на фоне объекта с увеличением $90\times$. С целью реализации возможности измерения больших образцов со сложной топологией поверхности эллипсометр оснащен двухкоординатным программно-управляемым предметным столиком, снабженным цифровыми датчиками линейных перемещений. Пределы перемещения столика по каждой координате составляют от 0 до 150 мм, погрешность позиционирования не превышает ± 10 мкм.

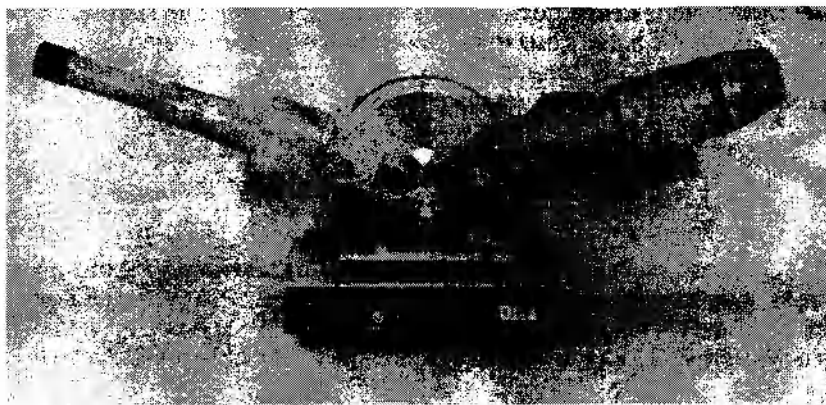


Рис. 2. Автоматический сканирующий микроэллипсометр

Рис. 3. Тестовый образец

Эллипсометр обладает развитым программным обеспечением, разработанным в среде Windows, которое позволяет получать графическое распределение толщин и оптических констант по площади измеряемой поверхности в виде топограммы в условных цветах или трехмерной графики.

Метрологическая аттестация эллипсометра осуществлялась с помощью образцовых эллипсометрических призм и регламентировалась требованиями [5].

Для демонстрации работоспособности прибора были изготовлены тестовые образцы, один из которых изображен на рис. 3. Образец представлял собой структуру SiO_2/Si . Толщина пленки основного окисла составляла 1000 \AA . Химическим травлением окисла были получены рельеф в виде канавки шириной 50 мкм и окно квадратной формы размерами $0,3 \times 0,3 \text{ мм}$. Толщина остаточного окисла в этих локальных элементах после травления равнялась приблизительно 30 \AA . На рис. 4 показано изменение толщины D пленки окисла в направлении сканирования Y , пространственно соотношенное с геометрией профиля вытравленной канавки. Флуктуации величины D в пределах участков ω_y , вызваны изменениями поляризационных параметров в момент пересечения лазерным пятном границ объекта. Интервал ω_y примерно соответствует размерам сканирующего пятна.

С помощью эллипсометра была измерена неоднородность по толщине вытравленного окисла в квадратном окне тестового образца. На рис. 5, *a* представлена топограмма распределения толщин остаточного окисла (в условных цветах), а на рис. 5, *b* демонстрируются результаты этих измерений в виде трехмерной графики. Прибор позволил зафиксировать неоднородность по

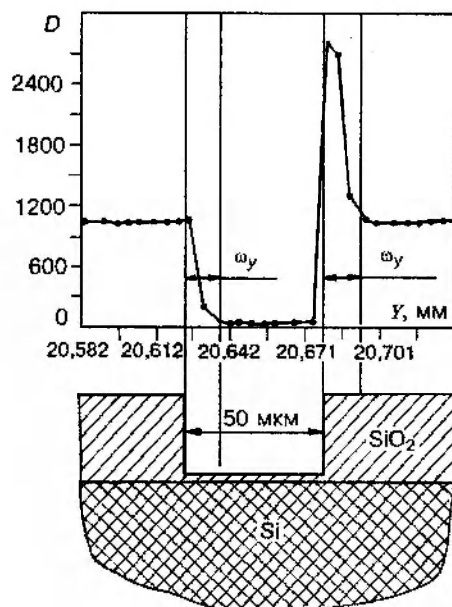
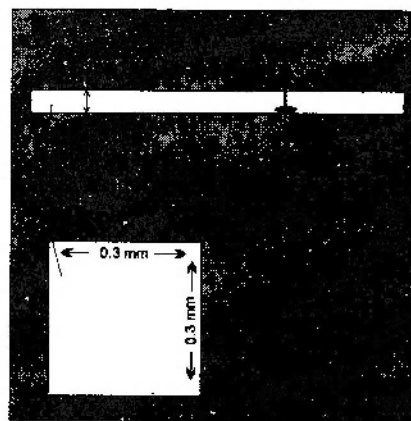


Рис. 4. Изменение толщины окисла тестового образца в направлении сканирования Y

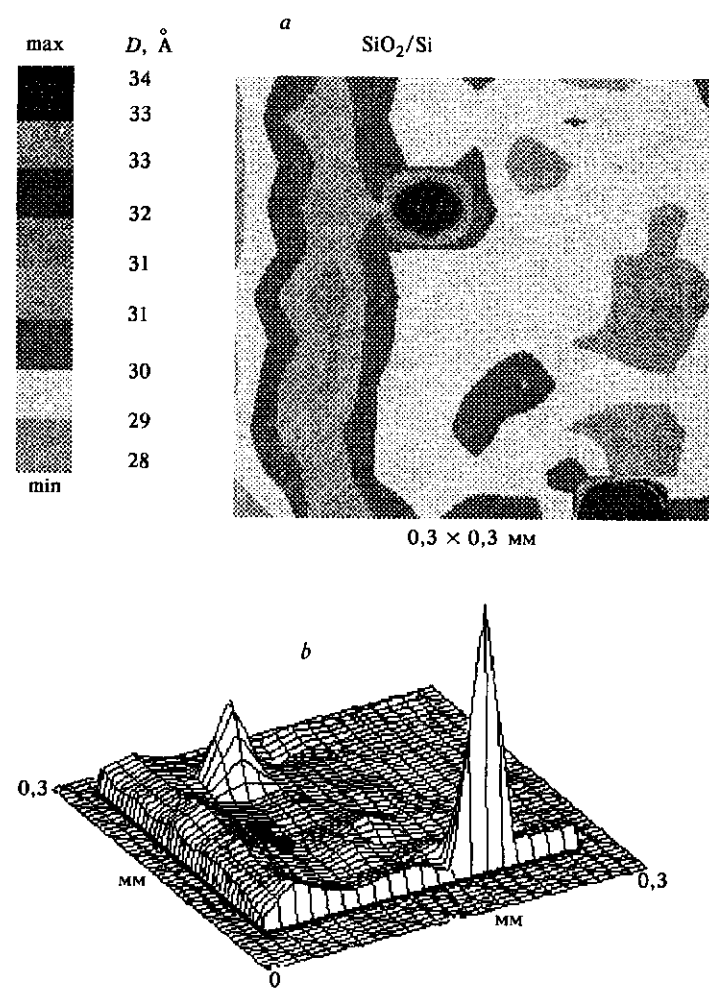


Рис. 5. Топограмма распределения толщин остаточного окисла в окне тестового образца (а) и результаты этих измерений в виде трехмерной графики (b)

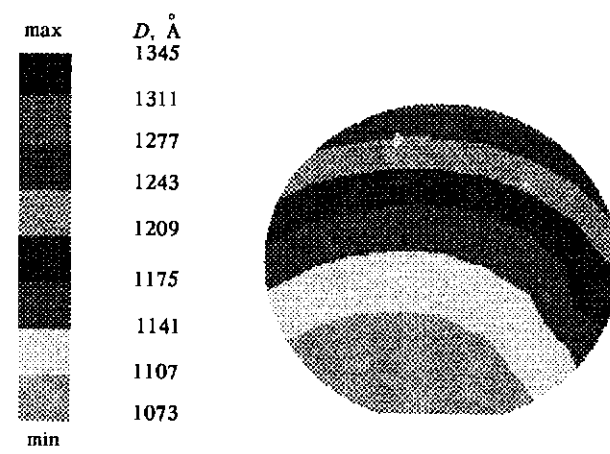


Рис. 6. Топограмма распределения толщин термического окисла SiO₂ на поверхности кремниевой пластины

.....

толщине окисла в пределах нескольких ангстрем, а также два ярко выраженных дефекта поверхности размером 10—20 мкм.

Эллипсометр также может быть эффективно использован при контроле поверхности образцов большой площади с размерами до 150 × 150 мм. В качестве демонстрации такого режима работы прибора на рис. 6 представлена топограмма распределения толщины термического окисла SiO₂, выращенного на поверхности стандартной кремниевой пластины. Отчетливо прослеживается клиновидность пленки окисла, зависящая от режимов процесса роста и местоположения образца в реакторе.

Таким образом, сканирующий микроэллипсометр «Микроскан» сочетает в себе достоинства высокочувствительного поляризационного микросканера и прецизионной двухкоординатной сканирующей системы и может быть широко использован при проведении измерений параметров поверхностей твердых тел и жидкостей в микроэлектронике, оптике, органической и неорганической химии, электрохимии, химии высокомолекулярных соединений, биологии, медицине, экологии и в других областях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лонский Э. С. Локальные эллипсометрические измерения // Эллипсометрия: теория, методы, приложения. Новосибирск: Наука, 1991. С. 138.
2. Спесивцев Е. В., Рыхлицкий С. В. Эллипсометрия высокого пространственного разрешения // Автометрия. 1997. № 1. С. 73.
3. А. с. 4235335 СССР. Спектроэллипсометр /С. В. Рыхлицкий, В. К. Соколов, В. Н. Федоринин. Опубл. 28.07.89, Бюл. № 27.
4. Рыхлицкий С. В., Святешев К. К., Соколов В. К., Хасанов Т. Х. О влиянии многократного отражения на работу фазовой кварцевой пластинки // Оптика и спектроскопия. 1987. 63, вып. 5. С. 1092.
5. Государственная система обеспечения единства измерений. Эллипсометры. Методика поверки: Метод. указания /Госкомитет СССР по стандартам. Новосибирск: СНИИ метрологии, 1987.

Поступила в редакцию 25 ноября 1996 г.