View metadata, citation and similar papers at core.ac.uk
brought to you by CORE
provided by Electronic Archive of Kyiv Polytechnic Institute

УДК 621.326.7

КОНТРОЛЬ ТОВЩИНИ ТОНКИХ ПЛІВОК ЕЛІПСОМЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ

**© А. В. Юшко, М. А. Зенкін, д.т.н., професор,
Київський національний університет
технологій та дизайну, Київ, Україна**

Проведено описание работы лазерного эллипсометрического микроскопа ЛЭМ-3 для контроля толщины тонких пленок. Показано, что эллипсометрические методы контроля позволяют измерять толщины и коэффициенты преломления тонких прозрачных диэлектрических пленок в диапазоне толщин от 0,3 нм до 1500 нм (0,0003–1,5 мкм) с погрешностью измерения ±0,3 нм.

A description of the laser ellipsometrical microscope LEM-3 for control the thickness of thin films was pursued. It is rotined that the elipsometrical methods of control allow to measure thickness and coefficients of refraction of transparent dielectric thin-films in the range of thickness from 0,3 nm to 1500 nm (0,0003–1,5 mkm) with the error of measuring ±0,3 nm.

В останні роки контроль товщини методами еліпсометрії широко застосовувався в техніці тонких плівок, плівкових напівпровідникових схем, діелектричних, напівпровідникових і металевих покриттів.

Це пояснюється тим, що еліпсометрія має істотні переваги перед іншими методами, оскільки для дослідження тонких плівок і граничних шарів цей поляризаційно-оптичний метод не вимагає спеціальної підготовки поверхні, дозволяє вести спостереження при різних фізичних умовах (температура, тиск). Метод еліпсометрії заснований на вивченні зміни стану поляризації світла через його взаємодію з поверхнею. Світло являє собою хвильовий процес, що змінюється в часі та взаємозалежні електричні й магнітні поля. Електромагнітне поле характеризується двома взаємозалежними векторами — вектором напруженості електричного поля і вектором напруженості магнітного поля, які перпендикулярні один одному й до напрямку поширення світла. Різні явища, що виникають під дією світла, наприклад, фотоелектричні, хімічні, визначаються напруженістю електричного поля. Тому вимірювання вектора напруженості електричного поля, який часто називають світловим вектором, представляють найбільший практичний інтерес [1].

Світло представляє хвильовий процес і складається з поперечних хвиль, що роблять коливання перпендикулярно до напрямку поширення хвилі, причому кожне з коливань має свою власну площину. Якщо представ-

лені всі площини коливань, то світло в такому випадку не поляризоване.

Поляризоване світло відрізняється від природного певним упорядкованим станом. Форма кривої, яку описує кінець проекції світлового вектора на площині, перпендикулярній до напрямків поширення, визначає тип поляризації.

Стан еліптичної поляризації визначається еліпсометричними параметрами: кутом повороту ψ площини поляризації та відносною різницею зсуву фаз Δ між компонентами p- і s-поляризацій.

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{\vec{E}_p^{\text{отр}}}{\vec{E}_s^{\text{отр}}} : \frac{\vec{E}_p^{\text{пад}}}{\vec{E}_s^{\text{пад}}} = \frac{R_p}{R_s},$$

де $\vec{E}_s^{\text{отр}}$ і $\vec{E}_p^{\text{отр}}$ — нормальна та паралельна складові вектора електричного поля відбитого променя; $\vec{E}_s^{\text{пад}}$ і $\vec{E}_p^{\text{пад}}$ — нормальна та паралельна складові вектора електричного поля падаючого променя; R_p й R_S — коефіцієнти відбиття; Δ розраховується як відносна різниця зсуву фаз між p і s компонентами:

$$\Delta = \delta_p^{\text{отр}} - \delta_s^{\text{отр}} = \delta_p - \delta_s.$$

Коефіцієнти відбиття R_p й R_s мають комплексний характер. Відношення комплексних коефіцієнтів відбиття (ρ) визначається наступним рівнянням:

$$\rho = \frac{\tilde{R}_p}{\tilde{R}_s} = \frac{R_p}{R_s} e^{i(\delta_p - \delta_s)} = \operatorname{tg}\psi \cdot e^{i\Delta}.$$

Дане рівняння називається фундаментальним рівнянням еліпсометрії.

Величина ρ для випадку тонкої прозорої діелектричної плівки є функцією багатьох змінних:

$$\rho = \rho(n, k, n_1, d_1, \lambda, \varphi_0),$$

де n — показник заломлення напівпровідникового матеріалу; k — хвильовий вектор; n_1 — показник заломлення плівки; d_1 — товщина плівки; λ — довжина хвилі; φ_0 — кут падіння світлової хвилі.

Оскільки стан поляризації світла характеризується тільки двома параметрами ψ і Δ, то з вимірювань можна визначити також два параметри, задаючи значення всіх інших. Так, для чистої поверхні напівпровідника ($d_0 = 0$) можна визначити оптичні константи для даної довжини хвилі λ при заданому куті φ_0. Для напівпровідника, покритого діелектричною плівкою, при відомих значеннях оптичних констант підкладки n і k при заданих λ і φ_0 можна визначити параметр плівки d_1 і n_1.

За допомогою ЕОМ були підраховані конкретні залежності Δ і ψ від товщини й показника заломлення діелектричної плівки, нанесеної на поверхню кремнію, германію й інших напівпровідників.

Розрахунки були проведені для кутів падіння φ_0 — 45° й 70°; λ = 0,6328 мкм для різних значень n_1 (від 1,10 до 3,00) і різних значень товщини плівки (0–0,3 мкм).

Практичні вимірювання товщини діелектричних плівок еліпсометричним методом викону-

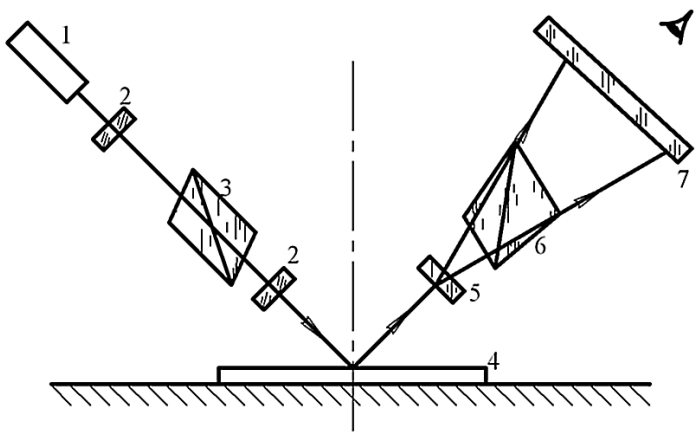
ють на лазерних еліпсометричних мікроскопах [1]. На рис. наведена принципова оптична схема лазерного еліпсометричного мікроскопа ЛЭМ-3.

Досліджувана поверхня напівпровідникової пластини *4* висвітлюється лінійно поляризованим пучком монохроматичного світла від газового лазера *1*. Поляризація пучка світла лазера, яке проходить через об'єктиви *2*, здійснюється за допомогою спеціальною призми-поляризатора *3*. Відбитий промінь світла від поверхні, яка досліджується, проходить через об'єктив *5* і призму-аналізатор *6* і дає на екрані мікроскопа *7* збільшену еліпсометричну картину. Додаткове збільшення цієї картини може бути отримано, якщо замість екрана *7* помістити світлочутливу площадку. У цьому випадку еліпсометрична картина відтворюється на екрані телевізора. Загальне збільшення телевізійного лазерного еліпсометричного мікроскопа ЛЭМ-3 становить 400×, що дозволяє досліджувати невеликі ділянки поверхні з лінійними розмірами в кілька мікрометрів.

Мінімальні розміри мікроструктур, для яких можна виміряти товщину плівки, залежать також від форми досліджуваного елемента й відстані між ними.

Визначаючи за показниками шкал поляризатора й аналізатора параметри φ і Δ та порівнюючи їх з еліпсометричними параметрами складових (протравленої) підкладки, можна точно визначити, чи є у отворах залишковий окис. Слід зазначити, що даний метод дозволяє виявити присутність у отворі окисної плівки товщиною в кілька десятків ангстрем ($\sim 5 \cdot 10^{-3}$ мкм), що іншими методами виявити практично неможливо.

Крім розглянутого еліпсометричного методу, який призначений для дослідження контролю товщин тонких плівок, ці методи також можуть використовуватися для вимірювання оптичних параметрів поверхневих мікроструктур, а також розподілу оп-



Оптична схема лазерного еліпсометричного мікроскопа

тичних властивостей матеріалів і товщин тонкоплівкових шарів по поверхні зразка з високим просторовим діапазоном [2]. Пристрій скануючого мікроеліпсометра є ефективним аналітичним засобом для дослідження й контролю параметрів поверхні в наступних областях: фізика та хімія поверхні; фізика й хімія тонких плівок; фізика напівпровідників, мікро- і нано-електроніка; кристалофізика й оптика; хімія органічних сполук й електрохімія та ін. [2].

Оптична частина пристрою розроблена на основі оригінальної статичної схеми еліпсометричних вимірювань. Висока швидкість вимірювань може забезпечуватися за рахунок відсутності обертання поляризаційних елементів під час вимірювання й модуляції сигналу, а знімання даних — здійснюватися в безперервному режимі при постійному вимірюванні еліпсометричних параметрів у процесі переміщення столика [3].

За допомогою еліпсометричних методів контролю можна також досліджувати кінетику росту окисних плівок при різних температурах, досліджувати зміни товщини й показника заломлення плівок при різних зовнішніх впливах.

Еліпсометричні методи контролю дозволяють вимірювати товщини й коефіцієнти заломлення тонких прозорих діелектричних плівок у діапазоні товщини від 0,3 нм до 1500 нм (0,0003–1,5 мкм) на полірованих поверхнях напівпровідникових пластин, з похибкою вимірювання ±0,3 нм. Такі вимірювання скануючим мікроеліпсометром дозволяють виявити наявність дефектів на ранній стадії, провести відбракування структур та запобігти наступних дорогих технологічних операцій, що є доцільним в процесі контролю.

1. Эллипсометрический комплекс для исследования быстропротекающих высокотемпературных процессов / С. В. Рыхлицкий, В. А. Швец, С. И. Чикичев, В. Ю. Прокопьев, Е. В. Спесивцев // Автометрия. — 2004. — Т. 40. — № 6. — С. 61—69. 2. Рыхлицкий С. В. Сканирующий микроэллипсометр / Рыхлицкий С. В., Спесивцев Е. В., Швец В. А., Прокопьев В. Ю. // Фотометрия и ее метрологическое обеспечение : Всероссийская науч.-техн. конф., 15-17 апр. 2009 г. : тезисы докл. — 2009. — 18. — С. 34—36. 3. Швец В. А. Эллипсометрическая установка высокого временного разрешения для изучения высокотемпературных процессов / Швец В. А., Рыхлицкий С. В., Спесивцев Е. В., Прокопьев В. Ю. // Фотометрия и ее метрологическое обеспечение : Всероссийская науч.-техн. конф., 15-17 апр. 2009 г. : тезисы докл. — 2009. — 18. — С. 57—58.

Рецензент — В. Г. Здоренко,
д.т.н., професор, КНУТіД

Надійшла до редакції 04.06.10