

О перспективах создания гибридной эллипсометрической системы на базе ближнепольного флуоресцентного капиллярного ККТ зондового датчика

А. Н. Горляк

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

E-mail: ellipsometry@mail.ru

Д. А. Козодаев

ООО «Активная фотоника»
Зеленоград, СПб

E-mail: info@ntmdt-russia.com

В. А. Мошников

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

E-mail: vamoshnikov@mail.ru

Н. С. Пщелко

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

E-mail: nikolsp@mail.ru

В. В. Трушлякова

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

E-mail: vvtrushliakova@mail.ru

Аннотация. Для решения обратной задачи эллипсометрии (например, определения оптических констант и толщин слоёв) необходимо построить оптическую (эллипсометрическую) модель, описывающую отражение поляризованного света от исследуемой структуры. Одним из ключевых факторов, усложняющих модель, является шероховатость поверхности и межфазных границ. Обычно шероховатость вводят как дополнительный подгоночный параметр (например, в качестве вклада в толщину и объёмную долю материала в рамках эффективной среды/переходного слоя), что увеличивает неопределённость решения. Ближнепольная микроскопия с флуоресцентным капиллярным зондовым датчиком на основе коллоидных квантовых точек позволяет независимо измерить топографические параметры поверхности и количественно оценить параметры шероховатости. Если эти данные используются как известные входные параметры в эллипсометрической модели, количество неизвестных сокращается, а точность и достоверность решения повышаются, что в итоге приводит к упрощению эллипсометрической модели.

Ключевые слова: обратная задача эллипсометрии, эллипсометрическая модель, точность решения, флуоресцентный капиллярный зондовый датчик, коллоидные квантовые точки

I. КОМБИНИРОВАНИЕ МЕТОДА ЭЛЛИПСОМЕТРИИ И ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Решение обратной задачи эллипсометрии требует построения модели, учитывающей все значимые физические факторы, влияющие на отражение поляризованного света от исследуемой структуры, важными из которых являются шероховатость поверхности и межфазных границ.

В традиционном подходе шероховатость вводят в эллипсометрическую модель в виде дополнительного подгоночного параметра, например, как «эффективный слой» с варьируемой толщиной и объёмной долей материала в рамках приближения эффективной среды, что ведёт к росту неопределённости конечных результатов.

Зондовая микроскопия позволяет независимо определять топографические параметры поверхности, включая количественные характеристики шероховатости (среднеквадратичное отклонение, корреляционное расстояние и др.). Введение этих данных в эллипсометрическую модель в качестве априорно известных величин уменьшает число подгоночных параметров и снижает неопределённость обратной задачи, что повышает достоверность получаемых результатов. Такой подход реализован, например, в работе [1], где АСМ выполняет функцию эталонного инструмента для калибровки и упрощения эллипсометрической модели.

В работе [2] с помощью ВУФ-спектрального эллипсометра исследовались образцы синтетического алмаза, полученные методом НРНТ, с различным качеством полировки, имеющие, соответственно, различную шероховатость поверхности, измеренную с помощью АСМ.

Анализируя спектры поляризационных параметров и диэлектрическую функцию в зависимости от шероховатости, авторы выделяли идеальную диэлектрическую функцию алмаза с идеальной плоской поверхностью, используя которую, с большой точностью рассчитывали оптическую толщину шероховатого слоя по данным, полученным только с помощью спектральной эллипсометрии. Далее была получена линейная зависимость между оптической шероховатостью и шероховатостью, измеренной с помощью АСМ.

Авторы показывают, что диэлектрическая функция, полученная в рамках, представленных в работе [2] исследований, подходит для характеристики шероховатости поверхности алмаза и может быть использована для оценки эффекта модификации его поверхности.

Одной из наиболее показательной из последних работ по совмещению АСМ и эллипсометра является работа [3] корейских инженеров. Авторы модернизировали уже

существующий эллипсомер так, чтобы он мог работать совместно с головкой АСМ. Ориентируясь на отчеты авторов, можно сделать выводы, что главная сложность заключалась в том, чтобы обеспечить достаточное рабочее расстояние для головки АСМ, сохранив при этом малый размер пятна (< 20 мкм). В работе [3] подробно описывается конструкция основных функциональных модулей, а также пути оптимизации фокусирующей оптической системы. Разработанный авторами прибор работает в диапазоне 190–850 нм с высокой точностью и скоростью измерения.

II. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ БЛИЖНЕПОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ И ФЛУОРЕСЦЕНТНЫХ ЗОНДОВЫХ ДАТЧИКОВ

Параллельно с развитием гибридных эллипсометрических систем активно совершенствуются методы ближнепольной оптической микроскопии, позволяющие совмещать топографическое картирование с локальным оптическим анализом. Значительный вклад в это направление внесли работы авторов настоящей работы по созданию флуоресцентных зондовых датчиков на основе коллоидных квантовых точек (ККТ) [4, 5, 6]. В качестве чувствительных элементов используются полупроводниковые ККТ системы I–III–VI, обладающие высокой фотостабильностью и настраиваемым спектром люминесценции [7]. Такие датчики интегрируются в капиллярные зонды для сканирующей ближнепольной оптической микроскопии (СБОМ), что позволяет регистрировать флуоресцентный сигнал с субдифракционным разрешением.

Техническая реализация таких зондов защищена патентом [8], в котором описан зонд ближнепольного оптического микроскопа, содержащий капилляр с нанесённым на его торец слоем металла и расположенными внутри капилляра флуоресцентными квантовыми точками. Подобные конструкции обеспечивают высокую эффективность сбора излучения и позволяют проводить одновременные топографические и оптические измерения. Сама конструкция капилляра обеспечивает дополнительную защиту средства оптического согласования. В отличие от прототипов, в которых зонд выполнен в виде сплошного световода, капиллярная конструкция обеспечивает повышенную механическую надёжность. В случае же использования двух изолированных проводящих слоёв вместо одного представляется возможным повысить разрешающую способность.

Дальнейшее развитие аппаратной базы для наномасштабных исследований отражено в работах, посвящённых современному зондово-оптическому оборудованию [9, 10]. В них рассматриваются как промышленные, так и научные установки, интегрирующие методы АСМ, СБОМ и спектроскопии, что создаёт предпосылки для создания полностью совмещённых систем, в которых эллипсометрия дополняется локальными оптическими измерениями, а данные о шероховатости, получаемые с высоким разрешением, могут непосредственно использоваться в эллипсометрических моделях.

Предложенная авторами настоящей работы гибридная эллипсометрическая система на базе ближнепольного флуоресцентного капиллярного зондового датчика на основе перовскитов и бинарных коллоидных квантовых точек также способна обеспечить

независимую количественную оценку шероховатости, позволяя сократить число неизвестных параметров и упростить эллипсометрическую модель, повышая тем самым корректность решения обратной задачи эллипсометрии. Использование разработанного ранее флуоресцентного капиллярного зондового датчика [7, 8], интегрированного в единую систему с эллипсометрическим трактом, позволяет совместить высокочувствительный оптический анализ с локальным топографическим картированием, причём данные о шероховатости и локальных оптических свойствах могут быть получены практически одновременно в одной и той же области образца, что открывает новые возможности для точного моделирования и интерпретации результатов решения некорректных математических задач.

Использование различных технических решений авторов настоящей работы [11, 12] по реализации блочно-модульного эллипсометрического тракта с волоконно-оптическими элементами обеспечивает аппаратную адаптивность системы анализа состояния поляризации образца в локальной области, соответствующей области сканирования капиллярного ближнепольного ККТ зонда. Авторами, в перспективе, рассматривается возможность создания в зоне острия зонда средства оптического согласования, реализующего такие же функции, как в безапертурной гибридной системе, представленной в работах [13, 14].

Установки, описываемые в данных работах, основаны на комбинировании АСМ в контактном режиме и эллипсометра (с фиксированной длиной волны и углом падения). Зонд, например, с золотым покрытием создаёт локальное усиление электромагнитного поля за счёт поверхностных плазмонов. Эллипсомер должен быть настроен в «нуль-режим». При приближении зонда ближнепольное взаимодействие нарушает условия гашения, и сигнал отражает локальные оптические свойства образца. При этом вклад дальнего поля подавляется вычитанием фоновой составляющей, которая регистрируется при подъёме зонда на 100 нм.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие методов ближнепольной оптической микроскопии и создание флуоресцентных капиллярных зондов на основе коллоидных квантовых точек [4–8] открывает новые возможности для построения гибридных измерительных систем.

Предложенная авторами настоящей работы гибридная эллипсометрическая система на базе ближнепольного флуоресцентного капиллярного зондового датчика (на основе перовскитов и бинарных ККТ) позволяет:

- 1). Получать независимую количественную оценку параметров шероховатости непосредственно в области эллипсометрического анализа.
- 2). Использовать эти данные в качестве априорно известных величин при построении оптической модели, что уменьшает число подгоночных параметров.
- 3). Повысить корректность решения обратной задачи эллипсометрии.

4). Обеспечить одновременное получение топографической и локальной оптической информации с субдифракционным разрешением.

Интеграция разработанного ранее флуоресцентного капиллярного зонда [7, 8] в единую систему с эллипсометрическим трактом создаёт предпосылки для создания компактного аналитического инструмента, пригодного для высокоточной характеристики гетерогенных структур в материаловедении, тонкоплёночных технологиях и биомедицинских исследованиях. Дальнейшее развитие подобных гибридных систем, в том числе, за счет комбинирования с новыми или модифицированными методиками, может существенно расширить возможности эллипсометрии как метода, позволяя учитывать не только статистические параметры шероховатости, но и её локальные особенности, что особенно важно при работе с неоднородными и наноструктурированными объектами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Franta, D., Ohlídal, I., Klapetek, P. Analysis of Slightly Rough Thin Films by Optical Methods and AFM // *Mikrochimica Acta*. 2000. Vol. 132. P. 443-447.
- [2] Kumagai, N., Yamasaki, S., Okushi, H. Optical characterization of surface roughness of diamond by spectroscopic ellipsometry // *Diamond and Related Materials*. 2004. Vol. 13. Issues 11-12. P. 2092-2095.
- [3] Sun Ja In, Min Ho Lee, Sung Yong Cho, Jun Seon Hong, In Ho Baek, Yong Hyun Kwon, Hee Kyu Yoon, Sang Youl Kim Development of a Microspot Spectroscopic Ellipsometer Compatible with Atomic Force Microscope // *Korean Journal of Optics and Photonics*. 2022. Vol. 33(5). P. 201-209.
- [4] Мошников В.А., Александрова О.А., Дробинцева А.О. и др. От лазерной оптической микроскопии до флуоресцентной микроскопии высокого разрешения. Коллоидные квантовые точки – биомаркеры в поисковых научных исследованиях // *Биотехносфера*. 2014. № 6(36). С. 16-30.
- [5] Мошников В. А., Александрова О.А., Лучинин В.В. и др. Полупроводниковые коллоидные наночастицы в биологии и медицине // *Биотехносфера*. 2012. № 5-6 (23-24). С. 40-48.
- [6] Мусихин С.Ф., Александрова О.А., Лучинин В.В. Сенсоры на основе металлических и полупроводниковых коллоидных наночастиц для биомедицины и экологии // *Биотехносфера*. 2013. № 2(26). С. 2-16. Лившиц М.Л., Шишялковский Б.И. Лакокрасочные материалы: Справ. пособие. 2-е изд. СПб.: Химия, 1996. 264 с.
- [7] Козодаев Д.А., Корепанов О.А., Мошников В.А. Флуоресцентный зондовый датчик на основе ККТ систем I–III–VI // В сб.: *Химическая термодинамика и кинетика*. 2022. тезисы докладов XII Международная научная конференция. Великий Новгород, 2022. С. 154-155.
- [8] Белорус А.О., Пастухов А.И., Краснобородько С.Ю., Козодаев Д.А., Мошников В.А. Зонд ближнепольного оптического микроскопа // Патент на изобретение RU 2731164 С1. Заявка № 2020110147 от 11 марта 2020 года.
- [9] Толкач Н.М., Казанков А.И., Козодаев Д.А., Кузнецов Е.В., Трусов М.А. Современное зондово-оптическое промышленное и научное оборудование для исследований аморфных и микрокристаллических полупроводниковых материалов // В сб.: *Аморфные и микрокристаллические полупроводники*. Материалы XIV Международной конференции. Москва, 2025, С. 65-66.
- [10] Козодаев Д.А., Нестеров С.И., Трусов М.А., Комарова С.О., Новиков И.А. Новые научные инструменты для наномасштабных исследований современных материалов и диагностики наноструктур // В сб.: *Электронные, спиновые и квантовые процессы в молекулярных и кристаллических системах*. Тезисы докладов и сообщений Всероссийской конференции с международным участием. Уфа, 2024, С. 80.
- [11] Алексеев С.А., Горляк А.Н., Прокопенко В.Т., Сухорукова М.В., Устинов С.Н., Фэн Ли Шуан. Автоматический универсальный спектральный эллипсометр. // Тезисы докладов Физмет-96. Второй международной конференции по проблемам физической метрологии Санкт-Петербург, 1996. С. 24-25.
- [12] Алексеев С.А., Горляк А.Н., Головченко А.Г., Дмитриев А.Л., Устинов С.Н., Фэн Ли Шуан. Измеритель поляризации излучения для волоконно-оптических систем. Тезисы докладов 2 межведомственной научно-технической конференции “Проблемные вопросы сбора, обработки и передачи информации в сложных радиотехнических системах”, 2 часть. Пушкин, 1995. С.41-42.
- [13] Tranchida D., Diaz J., Schön P., Schönherr H., Vancso G. J. Scanning Near-Field Ellipsometry Microscopy: imaging nanomaterials with resolution below the diffraction limit // *Nanoscale*. 2011, Vol. 3, P. 233-239..
- [14] Jianghua Bai, John Freeouf, Andres La Rosa Dual Mode AFM/Ellipsometer Imaging // *APS March Meeting*. 2010. Vol. 10. P. J15(1-3).