15

Восстановление оптических констант тонких пленок в ЭУФ диапазоне по данным лабораторной рефлектометрии

© Н.В. Загайнов, С.А. Гарахин, С.С. Морозов, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало

Институт физики микроструктур РАН,
603087 Нижний Новгород, Россия
e-mail: kolazagaunow41@gmail.com

Поступило в Редакцию 29 мая 2025 г.
В окончательной редакции 29 мая 2025 г.
Принято к публикации 29 мая 2025 г.

Изучена возможность использования лабораторных методов рефлектометрии для измерения оптических констант материалов в экстремальном ультрафиолетовом (ЭУФ) диапазоне. Анализ проведен на основе соединений тантала, являющегося поглотителем в заготовках для масок. Численно смоделирован эксперимент по измерению коэффициента отражения в зависимости от длины волны и угла падения для слоев поглотителя литографической маски. В рамках модели учтены реальные характеристики лабораторных приборов, а также погрешности измерения. Численный эксперимент показал перспективность применения лабораторной рефлектометрии к определению параметров тонких пленок на подложках, а эксперимент подтверждает применимость метода для решения реальных задач. Такие параметры структуры, как плотности, шероховатости и толщины восстанавливаются с высокой степенью точности. Отклонения полученных во всех реализациях значений от модельных значительно меньше 1 %, эксперимент показал хорошую точность по восстановлению оптических констант.

Ключевые слова: тонкие пленки, рефлектометрия, оптические константы, тантал, поглощение, дифрактометр, рефлектометр, коэффициент отражения, рентгеновское излучение, рентгеновская литография.

DOI: 10.61011/JTF.2025.10.61348.120-25

Введение

В настоящее время активно развивается технология литографии в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне длин волн [1–4]. Одной из составляющих литографического процесса являются маски, работающие на отражении излучения. Так как современные чипы обладают многослойной структурой, для создания интегральной схемы одной конфигурации может потребоваться до 80 литографических масок. Большая часть из них все еще производится методом ультрафиолетовой литографии (рабочая длина волны 193 nm). Однако уже сейчас до трети масок для одной интегральной схемы выполняются для литогрфических процессов с рабочей длиной волны 13.5 nm. Это так называемые ЭУФ (экстремальный ультрафиолет) маски. Таким образом, контроль качества таких масок становится все более важной задачей.

Заготовки под ЭУФ маски, обычно в литературе называемые англоязычным термином mask-blank (пустая или чистая маска), представляют собой многослойную тонкопленочную структуру на подложке [5]. Фактически это продукт технологии рентгеновской оптики. Слои маски изготавливаются с помощью ионно-пучкового напыления, обеспечивающего минимальное число дефектов в структуре многослойного зеркала [6]. И требования к их качеству предъявляются довольно высокие.

Схема mask-blank представлена на рис. 1.

Рассмотрим детально каждый слой. Самый нижний слой или даже не слой, а элемент — это подложка. Она должна быть выполнена из материала с низким значением температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) и с малой величиной среднеквадратичной поверхностной шероховатости. В большинстве случаев в качестве подложки используются пластины из плавленого кварца и оптических керамик с ТКЛР на уровне $10^{-8}\,\mathrm{K}^{-1}$.

Следующим снизу слоем является отражающее покрытие. Это многослойное рентгеновское зеркало, задачей которого является отражение излучения, прошедшего через „окна“ в верхних слоях. Зеркало должно обладать максимально возможным для рабочей длины волны коэффициентом отражения. Для работы на длине волны 13.5 nm, как правило, используются зеркала на

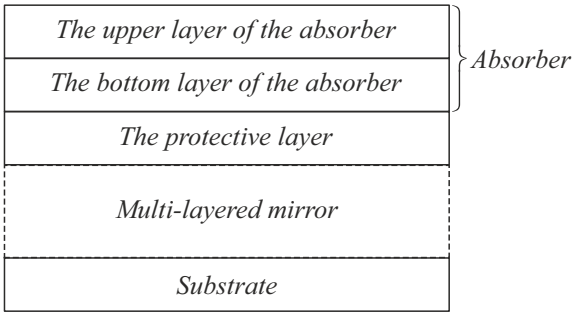

Рис. 1. Принципиальная структура mask-blank.

основе пары материалов Mo/Si с периодом около 7 nm и числом периодов порядка 50 [7,8]. Такие зеркала с барьерными слоями из карбида бора или углерода на длине волны 13.5 nm обладают коэффициентом отражения до 70 %. Эта величина может быть достигнута только на сверхгладких подложках со среднеквадратичной величиной поверхностной шероховатости на уровне 0.2 nm. Отсюда и вытекают высокие требования к поверхностной шероховатости подложки. Кроме того, известно, что Mo/Si-зеркала обладают высокой временной стабильностью отражательных характеристик.

Следующим за рентгеновским зеркалом слоем является защитный слой. Его задачей является защита многослойного зеркала от внешних воздействий как окружающей (порой агрессивной) среды, так и процессов плазменного травления. В качестве защитного слоя наиболее часто применяется тонкая (около 2.5 nm) пленка Ru.

На поверхность пленки рутения часто наносят буферный слой. Кроме задачи защиты лежащих ниже слоев от процессов плазменного травления, данный слой предотвращает наследование верхней структурой шероховатостей. В качестве буферного слоя может выступать, например, пленка нитрида хрома толщиной до 20 nm.

Самым верхним является поглощающий слой. Его задачей является поглощение падающего на маску излучения. Поскольку маска должна эффективно поглощать излучение (кроме вскрытых в поглотителе и следующих до рентгеновского зеркала слоях), этот слой выполняется из материалов, обладающих высоким коэффициентом поглощения на рабочей длине волны. Основным требованием к данной структуре, помимо свойств поглощения, является требование к ее аморфности. Аморфность структуры необходима для получения ровных краев маски (вскрытых окон на ее поверхности) после плазменного травления. С помощью плазменного травления получается необходимый рисунок на конечном образце. В тех областях, где поглотитель удален, излучение достигает многослойного рентгеновского зеркала и отражается от него. Там, где поглотитель сохранился, соответственно, излучение поглощается, не достигая отражающего слоя.

В общем случае и сам слой поглотителя может состоять из нескольких слоев. Дело в том, что многослойная (состоящая из более чем одного слоя) структура позволяет более эффективно поглощать излучение. Посредством изменения толщин можно добиться соответствующей интерференции между лучами, отраженными от различных слоев. Эта интерференция позволяет уменьшить отраженное от всего поглотителя излучение. Варианты состава поглотителя в соответствии с данными [5] представлены на рис. 2.

Как видно (рис. 2), в mask-blank на рабочей длине волны 13.5 nm в качестве поглощающего слоя используют материалы на основе соединений тантала. Тантал обладает относительно высоким поглощением в спектральной окрестности длины 13.5 nm. Например, пленка Ta толщиной 20 nm поглощает около 50 % излучения с

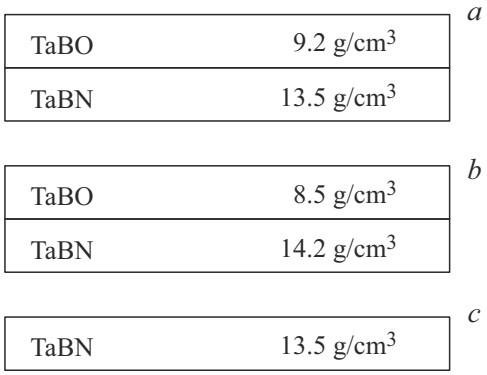

Рис. 2. Возможные структуры mask-blank.

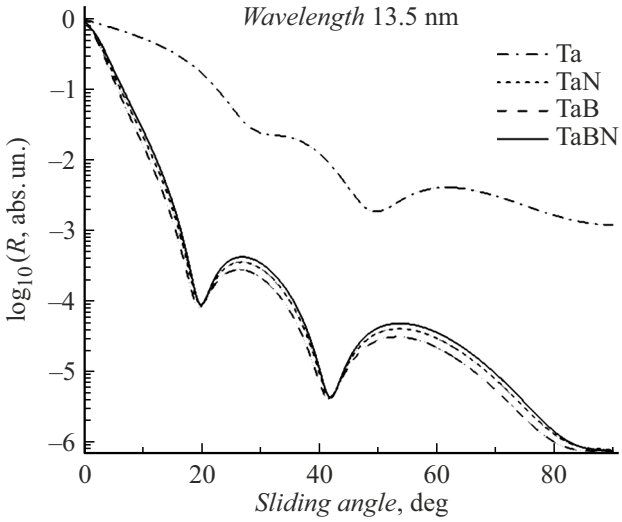

Рис. 3. Угловые зависимости коэффициентов отражения от угла падения для танталсодержащих пленок.

длиной волны 13.5 nm, а пленка толщиной 50 nm поглощает уже около 80 %; 100 nm Ta поглощают свыше 95 % излучения.

Расчеты показывают, что пленки на основе соединений тантала с другими элементами еще более эффективно подавляют излучение с длиной волны 13.5 nm. На рис. 3 приведены угловые зависимости коэффициентов отражения излучения с длиной волны 13.5 nm от различных танталсодержащих пленок с толщиной 20 nm (с табличными плотностями и нулевой поверхностной шероховатостью).

Из приведенных зависимостей можно увидеть, что отражение от пленки чистого тантала на 2–3 порядка превосходит отражение от пленок, состоящих из соединений тантала с бором и азотом. Также известно [5], что полученный методом магнетронного напыления чистый Ta представляет собой поликристаллическую пленку с относительно крупными размерами кристаллитов. Это приводит к росту шероховатости и внутренних напряжений. Добавление бора позволяет добиться аморфности

структуры, а азота — уменьшить величину внутренних напряжений в структуре.

Так как материалы TaN и TaBN [9] являются композитными, изменение в соотношениях отдельных элементов может качественно отразиться как на свойствах слоя поглотителя, так и всей маски в целом. Для изготовления литографических масок это обстоятельство является весьма существенным. Поэтому на практике требуется проводить оперативные измерения и восстанавливать физико-оптические свойства материалов поглотителя.

Существует два наиболее распространенных метода экспериментального определения оптических констант материалов. Первый метод связан с измерением коэффициента пропускания тонкой пленки [10–12]. В данном случае изготавливается тонкая свободно висящая пленка изучаемого материала. Как правило, пленка изготавливается методом магнетронного напыления путем осаждения на подложку с жертвенным слоем. Затем структура на подложке помещается в жидкий селективный травитель. Жертвенный слой растворяется, изучаемая пленка вылавливается на поддерживающую рамку. Далее она помещается в рефлектометр. Сквозь пленку пропускается излучение интересующего диапазона. Измеряется интенсивность излучения до пленки и после — так определяется коэффициент поглощения.

С использованием отношения Крамерса–Кронига комплексный показатель преломления может быть определен по результатам измерения поглощения излучения. Поскольку глубина проникновения ЭУФ излучения малая (порядка 30 nm для Ta в диапазоне длин волн 10–16 nm), для этого типа измерений требуются ультратонкие пленки. Для материалов, обладающих относительно малым поглощением в рассматриваемом диапазоне, пленки могут достигать толщин порядка 100 nm. Их изготовить и эксплуатировать относительно несложно. Но для танталсодержащих пленок толщина не должна превышать нескольких десятком нанометров (20–30 nm). Изготовление столь тонких пленок — серьезная технологическая задача большой сложности.

Еще одна существенная проблема для измерений в режиме пропускания заключается в том, что оптические свойства свободновисящих тонких пленок не всегда идентичны тонким слоям в стратифицированных системах на подложках. Здесь могут сказываться как наличие двух границ с воздухом для свободновисящей пленки, так и последствия ее изготовления (например, привнесение химических загрязнений при жидкостном травлении). Поэтому измерения на образцах, которые представляют структуру реального оптического компонента, таких, как тонкие пленки на подложке, гораздо более перспективны.

Второй подход к определению оптических свойств пленок связан с рефлектометрией. Исследуемая пленка изучается непосредственно на подложке. И лучше всего, когда она находится в той же конфигурации, что и применяемая на практике. В идеале таким образом можно изучать, например, полностью готовый mask-blank, т. е. фактически аттестовать его перед процедурой изготовления шаблона для процесса литографии.

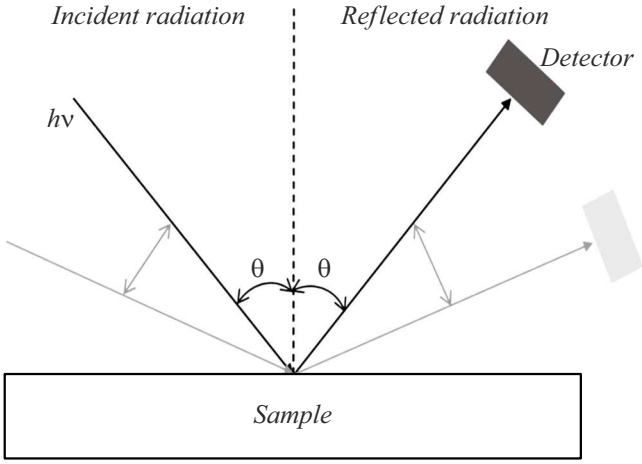

Рис. 4. Принципиальная схема эксперимента.

В данном случае коэффициент отражения излучения от изучаемой пленки измеряется как функция длины волны и угла падения [13,14]. Принципиальная схема эксперимента приведена на рис. 4.

По данным измерения коэффициентов отражения при изменении длины волны и угла падения излучения возможно решить обратную задачу и восстановить параметры структуры. Методов решения обратной задачи существует несколько. Об используемом в настоящей работе будет подробно сообщено ниже.

Как правило, подобные эксперименты (измерение коэффициентов отражения от тонкопленочной системы) проводятся на синхротронном источнике излучения. Например, такие эксперименты проводились в лаборатории Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) на кольце хранения электронов Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft für Synchrotronstrahlung (BESSY II) на линии мягкого рентгеновского излучения PTB [15,16]. Очевидно, что во многих случаях использование синхротрона для проведения измерений затруднено. Это может быть связано с загруженностью существующих синхротронных станций и с их удаленностью. Поэтому возможность проводить измерения в лабораторных условиях качественно повлияла бы на оперативность работ и проведения исследований в данной области.

Настоящая работа посвящена численному анализу возможностей использования лабораторных методов рефлектометрии для измерения оптических констант материалов в ЭУФ диапазоне.

1. Методика численного эксперимента

Основная идея и новизна предлагаемого авторами статьи подхода заключается в следующем.

Первое. Мы априори принимаем, что атомные факторы рассеяния атомов, входящих в исследуемый объект, хорошо известны и затабулированы, и в наших подгонках не являются параметром. Параметрами подгонки являются доли этих атомов в исследуемом образце, плотности и межслоевые переходные области в пленках.

Второе. Подгонка производится не отдельно по каждой кривой, а одновременно по набору угловых зависимостей коэффициентов отражения на различных длинах волн. Причем диапазон длин волн необходимо брать как можно шире, желательно по обе стороны от скачков поглощения материалов, входящих в исследуемую структуру. При таком подходе резко повышается точность восстановления плотностей и долей каждого материала в структуре.

В настоящей работе мы анализировали смоделированные кривые отражения, полученные для области ЭУФ излучения и жесткого рентгеновского излучения с длиной волны 0.154 nm. Эта длина волны (линия излучения Cu Kα) характерна для широко распространенных лабораторных дифрактометров. Именно поэтому мы и выбрали ее.

Ценность измерений на длине волны 0.154 nm обусловлена высокой чувствительностью жесткого рентгеновского излучения к толщинам пленок и интерфейсам, а также к определению среднего показателя преломления системы. Как правило, это излучение обладает высокой проникающей способностью (большой глубиной экстинкции), а значит, может охарактеризовать относительно протяженную по глубине тонкопленочную структуру.

В большинстве работ при определении среднего показателя преломления структуры авторы ориентируются на величину критического угла. Однако как в жестком, так и в мягком рентгеновском диапазонах на вид кривой отражения в области полного внешнего отражения большое влияние оказывает окисленный верхний слой, так как отраженная волна при таких углах скольжения формируется преимущественно в приповерхностном слое. В случае измерений на длине волны 0.154 nm наблюдается большое число интерференционных пиков, определяемых уже не только приповерхностной областью, но и всей глубиной структуры. Угловое положение интерференционных пиков определяется как толщиной пленки, так и коэффициентом преломления (и его изменениями) в ней, т.е. показателем преломления по всей глубине структуры (или по глубине проникновения излучения). Причем с увеличением угла скольжения излучения (фактически с увеличением порядкового номера интерференционного пика) влияние приповерхностного окисленного слоя ослабевает, его вклад в общий отраженный сигнал снижается, а положение пиков все более точно определяется только преломлением в пленках структуры — т.е. оптическими свойствами материалов самой структуры.

В настоящей работе рассматривалось применение следующих конкретных лабораторных приборов:

— дифрактометра Philips X'Pert PRO ($\lambda = 0.154$ nm),

— рефлектометра с монохроматором на основе схемы Черни–Тернера.

Дифрактометр Philips X'Pert PRO построен по схеме с четырехкристальным монохроматором на основе кристаллов Ge (220). Рабочие параметры рентгеновской трубки: $U_a = 30$ kV, $I_e = 20$ mA. Угловая расходимость излучения в плоскости дисперсии исследуемых образцов составляет 12 arc sec, размеры щелей на выходе монохроматора и входе детектора устанавливаются на уровне 100–300 μm, высоты щелей — 10 mm. Шаг сканирования по углу — 0.002°. Динамический диапазон интенсивности зондового пучка — 10^7. Измерения зеркального отражения происходят по схеме θ–2θ, т.е. при фиксированном положении рентгеновской трубки (источника излучения) повороту образца на угол θ отвечает поворот детектора на удвоенный угол. Более подробно об условиях измерений на дифрактометре можно посмотреть в [17].

Измерение отражательных характеристик тонкопленочных покрытий на подложках в мягком рентгеновском и ЭУФ спектральных диапазонах в ИФМ РАН производится с помощью измерительного стенда на базе рефлектометра с лазерно-плазменным источником и монохроматором Черни–Тернера с улучшенным спектральным разрешением [18]. Рабочий диапазон длин волн рефлектометра 5–60 nm. Однако охват такого широкого диапазона возможен при смене мишени лазерно-плазменного источника, а также дифракционной решетки — спектрально-селективного элемента. В наших численных экспериментах моделировались измерения в спектральной области 10–16 nm с золотой мишенью лазерно-плазменного источника. При этом выбиралась дифракционная решетка с плотностью штрихов 900 groove/mm. Для такой решетки спектральное разрешение прибора составляет лучше 0.015 nm.

Решение обратной задачи в рамках настоящей работы осуществлялась с помощью программного пакета Multifitting [19,20]. В основе программы лежит расширенная модель многослойной структуры. Для восстановления ее внутреннего строения по данным рентгеновской рефлектометрии межслоевые области (интерфейсы) представлены в виде линейной комбинации набора функций, соответствующих физическим процессам, протекающим при формировании интерфейсов: взаимодиффузия материалов, химическое взаимодействие, рост геометрической шероховатости. Программу Multifitting также отличает возможность проводить реконструкцию каждой структуры по произвольному количеству рефлектометрических кривых одновременно.

В настоящей работе в качестве модельной структуры была взята следующая последовательность тонких пленок на подложке кремния (рис. 5).

Основу изучаемой пленки составляет композит TaBN. Здесь подразумевается, что в ходе синтеза пленка TaBN нанесена на подложку из монокристаллического кремния. Выдвинуто предположение, что на границе между

пленкой и воздухом возможно образование оксида. В качестве такового здесь замоделирован слой TaBO толщиной 2 nm. Аналогично между пленкой и подложкой образуется силицид Ta_5Si_3 толщиной 2 nm. Толщина чистой пленки TaBN составляет 58 nm. А общая толщина тонкопленочной системы — 62 nm. Плотности для материалов ρ-слоев взяты из [5]. Шероховатости S выбраны произвольно, но по порядку величины соответствуют типичным шероховатостям для тонких пленок.

Еще раз хочется подчеркнуть, что мы здесь не обсуждаем реализуемость этой модельной системы. Для численного эксперимента можно было бы взять и другие параметры. Основным вопросом является возможность восстановления предложенной модельной структуры по рефлектометрическим данным.

Параметры приведенной модельной структуры являлись входными данными для программного пакета Multifitting. Далее в этой программе моделировались угловые кривые отражения для:

— длинны волны 0.154 nm в диапазоне углов 0–7° (Philips X'Pert PRO);

— ряда длин волн из диапазона 10–16 nm с шагом 0.3 nm (10, 10.3, 10.6 nm и т.д.) в диапазоне углов 0–90° (рефлектометр с монохроматором на основе схемы Черни–Тернера).

Диапазон длин волн был выбран, исходя из положения максимума интенсивности источника в рефлектометре с монохроматором на основе схемы Черни–Тернера и направленности метода на определение оптических констант материалов на длине волны 13.5 nm. Шаг был выбран исходя из необходимой точности восстановления структуры; при увеличении шага до 1 nm наблюдается уменьшение относительной точности на порядок.

Далее были выполнены серии численных экспериментов по моделированию коэффициентов отражения в зависимости от длины волны и угла падения — прямая задача рентгеновской рефлектометрии.

Программа Multifitting считает данные с высокой точностью. Однако реальные приборы обладают конечной чувствительностью и погрешностью измерения. Ошибки измерений в наших численных экспериментах учитывались следующим образом.

Для прибора дифрактометра Philips X'Pert PRO, в связи с его высокой чувствительностью, отбрасывались данные с уровнем сигнала ниже 10^{-7} по абсолютной величине коэффициента отражения. Также в каждой точке измерения была учтена случайная погрешность, так как количество фотонов, падающих на исследуемый образец, достаточно велико, и можно пренебречь членом, зависящим от коэффициента отражения. Таким образом, получаем выражение для случайной погрешности прибора:

$$X = X + X(-1 + 2\,\mathrm{rnd})\left(\frac{7}{100\,000}\right). \qquad (1)$$

Здесь X — коэффициент отражения, rnd — функция генератора случайных чисел в диапазоне от 0 до 1.

Для измерений на рефлектометре с монохроматором на основе схемы Черни–Тернера были взяты другие настройки. Чувствительность прибора ниже, поэтому отбрасывались данные по коэффициенту отражения ниже, чем 10^{-3}. Погрешность, связанная с сигналом, учитывала количество фотонов, долетающих до образца. Коэффициент отражения по определению это

$$R = \frac{N_R}{N_i}, \qquad (2)$$

где N_R и N_i — число отраженных и падающих фотонов соответственно. Относительная погрешность коэффициента отражения есть

$$\varepsilon_R = \sqrt{\frac{\overline{N}_i^2}{\overline{N}_R^2}\left(\frac{\Delta N_R^2}{\overline{N}_i^2} + \frac{\overline{N}_R^2(\Delta N_R)^2}{\overline{N}_i^4}\right)} = \sqrt{\varepsilon_{N_i}^2 + \varepsilon_{N_R}^2}. \qquad (3)$$

По статистике Пуассона она равна

$$\sqrt{\varepsilon_{N_i}^2 + \varepsilon_{N_r}^2} = \sqrt{\frac{1}{N_i} + \frac{1}{N_R}}. \qquad (4)$$

Из предыдущего уравнения мы можем найти соотношение для относительной погрешности измерения коэффициента отражения ε_R. Количество фотонов Ni было взято равным $2 \cdot 10^6$ фотонов, отражалось это на сигнале следующим образом:

$$\varepsilon_R(N_i) = \sqrt{\frac{1}{N_i} + \frac{1}{RN_i}}\,\#. \qquad (5)$$

Таким образом, у нас получается следующие выражения для учета погрешности в эксперименте:

$$X = X + X(-1 + 2\,\mathrm{rnd})\varepsilon_R(N_i). \qquad (6)$$

Эти параметры добавлялись к смоделированным кривым отражения от структуры, приведенной на рис. 5.

Основная цель настоящей работы заключалась в определении степени достоверности восстановления распределения электронной плотности многокомпонентной тонкой пленки на подложке по данным рефлектометрии, выполненной на лабораторных приборах с заданной точностью на лабораторном источнике рентгеновского излучения.

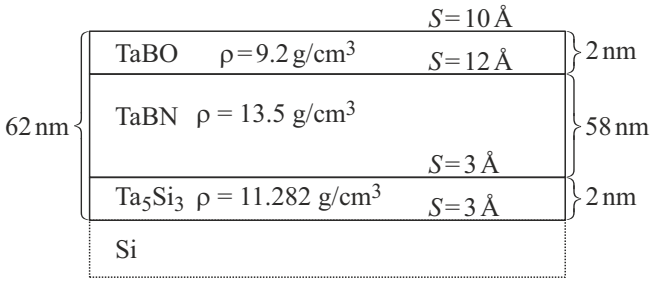

Рис. 5. Параметры модельной структуры.

Основные результаты работы

Параметр	Значения в модели (рис. 5)	Область вариации	Реализация 1	Реализация 2	Реализация 3	Реализация 4
Количество атомов Ta в оксиде	1	1–3	2.952	1.498	2.995	1.858
Количество атомов O в оксиде	1	1–3	2.954	1.497	2.995	1.851
Количество атомов B в оксиде	1	1–3	2.952	1.501	2.990	1.859
Шероховатость границы оксид-воздух, Å	10	8–12	9.996	9.999	10.005	9.993
Плотность оксида, g/cm^3	9.2	8–11	9.184	9.192	9.215	9.187
Толщина слоя оксида, ангстрем	20	10–30	19.9694	19.9827	20.0249	19.9812
Количество атомов Ta в пленке	1	1–3	2.248	1.976	1.352	2.058
Количество атомов B в пленке	1	1–3	2.237	1.977	1.355	2.052
Количество атомов N в пленке	1	1–3	2.252	1.975	1.351	2.062
Шероховатость границы оксид-пленка, ангстрем	12	10–14	12.024	12.015	11.984	12.007
Плотность пленки TaBN, g/cm^3	13.5	12–15	13.501	13.501	13.5	13.499
Толщина пленки, Å	580	400–700	580.0455	580.031	579.964	580.019
Количество атомов Ta в силициде	5	2–8	8	3.636	3.379	3.516
Количество атомов Si в силициде	3	2–6	4.825	2.189	2.001	2.053
Шероховатость границы силицид-пленка, Å	3	1–5	2.999	2.999	3.001	3.001
Плотность силицида, g/cm^3	11.282	10–13	11.281	11.282	11.286	11.289
Толщина слоя силицида, Å	20	10–30	19.9991	19.9976	20.0023	20.0048
Шероховатость границы силицид-подложка, Å	3	1–5	3	3	3	2.999

При решении задачи восстановления параметров структуры делались предположения на основе некоторых априорных данных. В частности, мы полагали известным наличие в слоях химических элементов тантала, бора и азота, кислорода и кремния. Это предположение представляется разумным, поскольку в ходе реального синтеза, как правило, используются чистые и хорошо известные материалы. Однако пропорции материалов в образовавшихся слоях могут отличаться от запланированных при синтезе, а потому также являются предметом исследования. Отличия могут проистекать из характера синтеза многокомпонентной пленки. В частности, пленка TaBN получается методом магнетронного распыления мишени TaB в смеси аргона и азота. Если пропорции атомов Ta и B в первом приближении еще могут соответствовать пропорции в магнетронной мишени (но это не определенный факт), то количество встраиваемого при росте азота неизвестно.

Для этих пропорций, а также для прочих параметров подгонки (шероховатости, толщины слоев, плотности) были определены области вариаций. Эти области приведены в третьей колонке таблицы. На самом деле пределы варьирования параметров здесь выбраны произвольно. Но это не является принципиальным для изучаемого метода. В других конкретных экспериментах пределы могут отличаться от выбранных. Также они могут опираться на некоторые априорные представления об изучаемом объекте.

После выбора параметров вариации нами в программном пакете Multifitting с учетом пределов варьирования была решена обратная задача и восстановлена структура. Для определения, насколько такое решение близко к истинному, данная операция проводилась 4 раза.

2. Результаты

В таблице приведены основные результаты работы. Первая колонка соответствует изучаемому параметру. Вторая колонка — значение параметра в соответствии с моделью (рис. 5). Третья колонка — область вариации параметров при численном эксперименте. Колонки с четвертой по седьмую — значения полученных в численном эксперименте параметров для четырех реализаций.

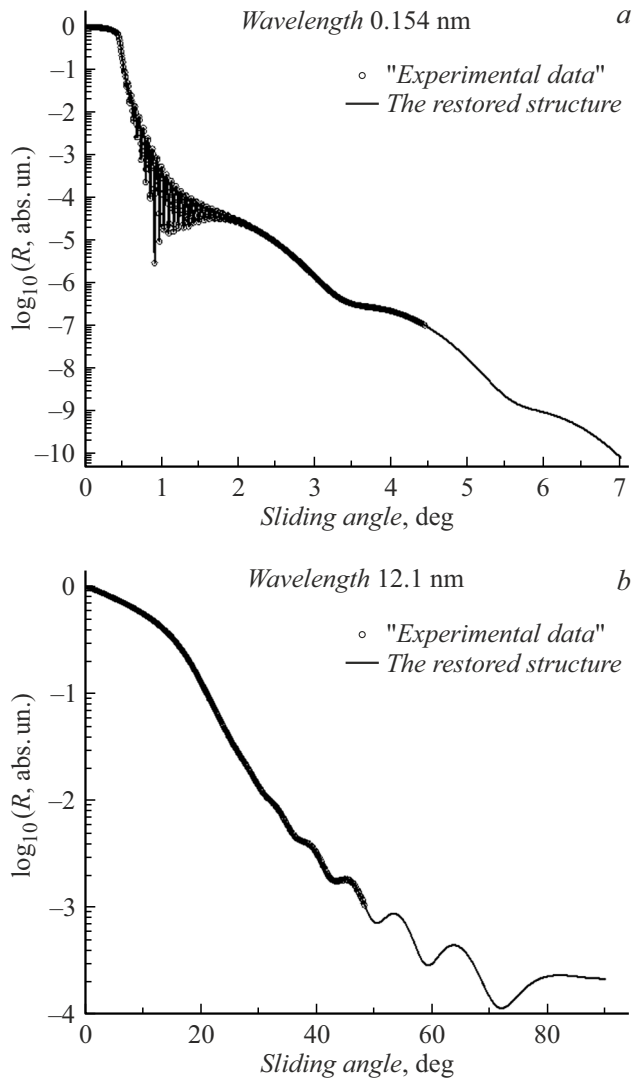

Рис. 6. Сравнение „экспериментальных“ данных отражения на длинах волн 0.154 (*a*) и 12.1 nm (*b*) с теоретическими от восстановленной структуры.

На рис. 6 приведены примеры рефлектометрических модельных данных и результатов подгонки для длин волн 0.154 и 12.1 nm.

Выводы

Из приведенных данных можно сделать следующие выводы. Во-первых, такие параметры структуры как плотности, шероховатости и толщины восстанавливаются с высокой степенью точности. Отклонения полученных во всех реализациях значений от модельных значительно меньше 1 %. Во-вторых, абсолютные значения количества атомов в слоях испытывают колебания от вариации к вариации в пределах заданной области определения. Однако соотношение элементов в пленках определяется с высокой степенью точности.

Таким образом, численный эксперимент показывает перспективность применения лабораторной рефлектометрии к определению параметров тонких пленок на подложках. Следующим шагом в наших исследованиях станет экспериментальное подтверждение этого вывода.

Финансирование работы

Анализ возможностей и определение точностей рефлектометров, их экспериментальное определение выполнены при поддержке гранта РНФ 21-72-30029-П, разработка метода и решение обратной задачи выполнены при поддержке гранта РНФ 21-72-20108-П.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] O. Wood, J. Arnold, T. Brunner, M. Burkhardt, J.H.-C. Chen, D. Civay, S.S.-C. Fan, E. Gallagher, S. Halle, M. He, C. Higgins, H. Kato, J. Kye, Ch.-S. Koay, G. Landie, P. Leung, G. McIntyre, S. Nagai, K. Petrillo, S. Raghunathan, R. Schlief, L. Sun, A. Wagner, T. Wallow, Yu. Yin, X. Zhu, M. Colburn, D. Corliss, C. Smolinski. Proceed. SPIE, **8322**, 832203 (2012). DOI: 10.1117/12.916292

[2] N.I. Chkhalo, N.N. Salashchenko. AIP Advances, **3** (8), 082130 (2013).

[3] T. Watanabe, T. Harada, S. Yamakawa. Proc. SPIE, **11908**, 1190807 (2021). DOI: 10.1117/12.2600896

[4] H. Levinson. *Principles of Lithography,* 4th ed. (SPIE, 2019), p. 524.

[5] Hoya Corporation, Morio Hosoya. *REFLECTIVE MASK BLANK AND METHOD OF MANUFACTURING A REFLECTIVE MASK* (Pattent US No.: 8, 709, 685 B2 29.04.2014)

[6] T. Liang, E. Ultanir, G. Zhang, S.-J. Park, E. Anderson, E. Gullikson, P. Naulleau, F. Salmassi, P. Mirkarimi, E. Spiller, Sh. Baker. J. Vacuum Sci. Technol. B, **25** (6), 2098 (2007). DOI: 10.1116/1.2779044

[7] S. Braun, H. Mai, M. Moss, R. Scholz, A. Leson. Jpn. J. Appl. Phys., **41** (6S), 4074 (2002).

[8] С.Ю. Зуев, Р.С. Плешков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, М.В. Свечников, Н.И. Чхало, F. Schäfers, M.G. Sertsu, A. Sokolov. ЖТФ, **89** (11), 1779 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.11.48344.130-19

[9] T. Shoki, M. Hosoya, T. Kinoshita, H. Kobayashi, Y. Usui, R. Ohkubo, Sh. Ishibashi, O. Nagarekawa. *Process development of 6-in EUV mask with TaBN absorber,* Proc. SPIE 4754, Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology IX, (1 August 2002). DOI: 10.1117/12.477007

[10] F. Delmotte, J. Meyer-Ilse, F. Salmassi, R. Soufli, C. Burcklen, J. Rebellato, A. Je'Rome, I. Vickridge, E. Briand, E. Gullikson. J. Appl. Phys., **124**, 035107 (2018).

[11] R. Soufli, F. Delmotte, J. Meyer-Ilse, F. Salmassi, N. Brejnholt, S. Massahi, D. Girou, F. Christensen, E.M. Gullikson. J. Appl. Phys., 125, 085106 (2019).

[12] M. Svechnikov, N. Chkhalo, A. Lopatin, R. Pleshkov, V. Polkovnikov, N. Salashchenko, F. Schäfers, M.G. Sertsu, A. Sokolov, N. Tsybin. J. Synchrotron Rad., **27**, 75 (2020). DOI: 10.1117/1.OE.60.4.044103
[13] R. Ciesielski, Q. Saadeh, V. Philipsen, K. Opsomer, J.-P. Soulié, M. Wu, P. Naujok, R.W.E. van de Kruijs, Ch. Detavernier, M. Kolbe, F. Scholze, V. Soltwisch. Appl. Optics, **61** (8), 2060 (2022). DOI: 10.1364/AO.447152
[14] V. Soltwisch, S. Glabisch, A. Andrle, V. Philipsen, Q. Saadeh, S. Schröder, L. Lohr, R. Ciesielski, S. Brose. *High-precision optical constant characterization of materials in the EUV spectral range: from large research facilities to laboratory-based instruments.* Proc. SPIE 12472, 37th European Mask and Lithography Conference, 124720Q (1 November 2022). DOI: 10.1117/12.2640176
[15] F. Scholze, J. Tümmler, G. Ulm. Metrologia, **40**, S224 (2003).
[16] F. Scholze, C. Laubis, C. Buchholz, A. Fischer, S. Ploeger, F. Scholz, H. Wagner, G. Ulm. Proc. SPIE, **5751**, 749 (2005).
[17] S.S. Andreev, A.D. Akhsakhalyan, M.A. Bibishkin, N.I. Chkhalo, S.V. Gaponov, S.A. Gusev, E.B. Kluenkov, K.A. Prokhorov, N.N. Salashchenko, F. Schäfers, S.Yu. Zuev. Centr. Europ. J. Phys., **1**, 191 (2003).
[18] S.A. Garakhin, N.I. Chkhalo, I.A. Kas'kov, A.Ya. Lopatin, I.V. Malyshev, A.N. Nechay, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.V. Svechnikov, N.N. Tsybin, I.G. Zabrodin, S.Yu. Zuev. Rev. Sci. Instrum., **91** (6), 063103 (2020). DOI: 10.1063/1.5144489
[19] M. Svechnikov. J. Appl. Crystallogr., **53** (1), 244 (2020). DOI: 10.1107/S160057671901584X
[20] M. Svechnikov. J. Appl. Cryst., **57**, 848 (2024). DOI: 10.1107/S1600576724002231