

ЗАЩИТНЫЕ СВОБОДНОВИСЯЩИЕ ПЛЕНКИ ДЛЯ УСТАНОВОК ПРОЕКЦИОННОЙ ЛИТОГРАФИИ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА

© 2023 г. С. Ю. Зуев¹, А. Я. Лопатин¹, В. И. Лучин¹,
Н. Н. Салащенко¹, Н. Н. Цыбин^{1, *}, Н. И. Чхало¹

¹Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного
научного учреждения “Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук”, ул. Академическая, 7, д. Афонино,
Кстовский район, Нижегородская область, 603087 Россия

*E-mail: tsybin@ipmras.ru

Поступила в редакцию 20.06.2023 г.

После доработки 20.07.2023 г.

Принята к публикации 20.07.2023 г.

Рассмотрены варианты структур свободновисящих пленок с высоким коэффициентом пропускания на длине волны 13.5 нм, которые разрабатывались для использования в установках проекционной экстремальной ультрафиолетовой (ЭУФ) литографии в качестве защитных и фильтрующих элементов. Основное внимание уделено наиболее проблемным с точки зрения изготовления и требований, предъявляемых к их характеристикам, сверхтонким свободновисящим пленкам (пелликлам), устанавливающимися перед маской (фотошаблоном) в современных ЭУФ сканерах и служащим для защиты поверхности маски от попадания загрязнений. Проведено сравнение основных подходов, которые используются при изготовлении сверхтонких свободновисящих пленок большой апертуры. Дан краткий обзор исследований, посвященных разработке пелликлов с высоким коэффициентом пропускания на длине волны 11.2 нм, которая может стать рабочей длиной волны для будущей ЭУФ литографии.

Ключевые слова: экстремальный ультрафиолетовый диапазон, проекционная литография, свободновисящая пленка, пелликл, абсорбционный фильтр

DOI: 10.31857/S0544126923700539, **EDN:** QAIWGO

1. ВВЕДЕНИЕ

Для защиты от загрязнений поверхности фотошаблона в установках оптической проекционной литографии с начала 80-х гг. прошлого века применяются пленочные экраны [1, 2], которые в англоязычной литературе называются pellicle (название происходит от латинского слова pellicula, являющееся уменьшительным от pellis — кожа).

Пелликл представляет собой прозрачную для излучения мембрану, располагающуюся на расстоянии нескольких миллиметров над рабочей поверхностью маски-фотошаблона и служащую барьером, препятствующим попаданию на поверхность маски пылинок или иных загрязнений (рис. 1). Осевшие же на поверхность пелликла частицы оказываются вне предметной плоскости, а потому при небольших размерах не оказывают негативного влияния на формируемое изображение маски на фоторезисте.

Особенно важно применение пелликлов при производстве логических микросхем, для изготов-

ления которых требуются сотни технологических операций, — появление дефекта хотя бы при одной из операций ведет к неработоспособности всей микросхемы и, как следствие, к значительным финансовым издержкам.

Концепция пелликла не нова и была реализована в природе: глаз большинства позвоночных животных снабжен прозрачной для видимого света роговицей, располагающейся вне фокуса и являющейся защитной оболочкой [3].

Прозрачные, с пропусканием более 99%, фторполимерные пленки толщиной около 830 нм [4, 5] применяются для защиты фотошаблона от загрязнений в литографических установках, работающих на длине волны 193 нм. Вследствие высокого коэффициента пропускания искажения волнового фронта, связанные с введением в оптическую схему литографа пелликла, минимальны [6].

Начавшиеся в 2001 г. в компании ASML (Нидерланды) работы по разработке прототипа сканера, работающего в экстремальном ультрафиоле-

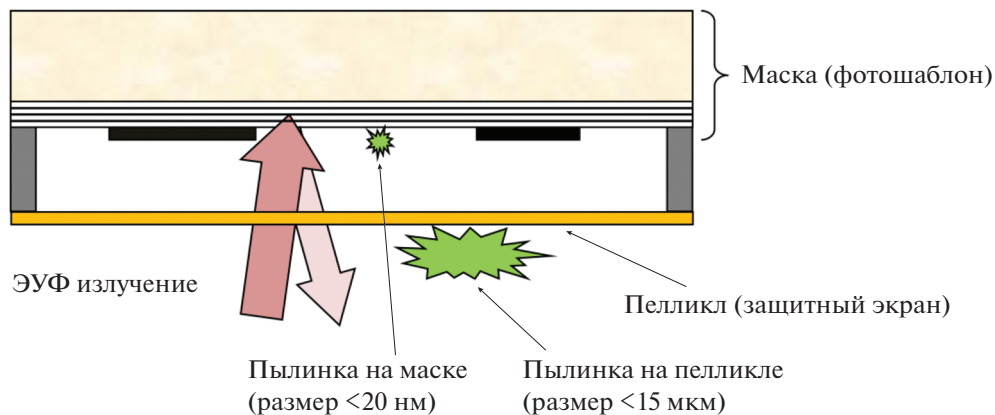


Рис. 1. Схематическое изображение отражательной маски (фотошаблона) и защитного экрана (пелликла), применяемых в установках проекционной ЭУФ литографии.

товом (ЭУФ) на длине волны 13.5 нм, подняли вопрос о пелликлах для будущих установок. Проблема заключается в том, что на длине волны 13.5 нм нет прозрачных материалов. А для того, чтобы коэффициент пропускания пленки составил хотя бы 90% на длине волны 13.5 нм, даже для наиболее прозрачных на этой длине волны материалов (таких, как кремний), ее толщина должна быть менее 60 нм.

Тонкие пленки непрочны и могут легко повреждаться. Поэтому рассматривались иные способы защитить маску от загрязнений в ЭУФ литографии (например, используя явление термофореза [7]) или предлагалось увеличить прочность пленки путем применения поддерживающей сетки [8].

От альтернативных вариантов, как менее эффективных, а также от применения поддерживающих сеток, влияющих негативно на коэффициент пропускания и вносящих искажения в проходящий фронт волны [9], в итоге отказались.

2. НА ПУТИ К ПОЛНОРАЗМЕРНОМУ *p*-Si ПЕЛЛИКЛУ

Отметим, что параллельно задаче разработки пелликлов, до 2013 г. шла интенсивная работа (в том числе в ИФМ РАН) по разработке тонкопленочных абсорбционных фильтров для ЭУФ литографов, предназначенных для подавления длинноволнового фонового излучения от оловянного лазерно-плазменного источника [10, 11]. Абсорбционные тонкопленочные фильтры предназначались для подавления излучения на длине волны 10.6 мкм (длина волны CO₂ лазера, применяющегося в лазерно-плазменном источнике) и в “глубоком ультрафиолетовом диапазоне” (диапазон длин волн 130–400 нм). Это излучение, отражаясь от зеркала-коллектора и попадая в оптическую систему литографа (рис. 2), вызывает нежелательный нагрев оптических элементов или паразитную засветку фоторезиста [12].

Перед разработчиками абсорбционных фильтров стояли проблемы аналогичные тем, которые решают разработчики пелликлов. Предполагалось, что пленочный фильтр спектральной очистки будет устанавливаться после сбора ЭУФ излучения зеркалом-коллектором, а потому будет испытывать большие тепловые нагрузки. Чтобы снизить температуру нагрева (а также потери ЭУФ излучения), пленочный фильтр должен иметь высокий коэффициент пропускания на рабочей длине волны, большую апертуру, чтобы распределить тепловую нагрузку по большой площади, а также высокую излучательную способность (тепловое излучение — по сути, единственный значимый способ охлаждения тонких свободновисящих пленок в вакууме при высокой температуре).

Качественного отличия тонкопленочных фильтров от пелликлов практически нет. Пленочный фильтр, как правило, имеет большую толщину, чтобы обеспечить нужную степень блокировки длинноволнового излучения и содержит в своем составе металл (с минимальным коэффициентом поглощения на длине волны 13.5 нм, например, Zr, Nb или Mo [11]), который нужен для подавления фонового инфракрасного излучения.

Но после того как были найдены иные, более надежные способы фильтрации фонового излучения (нанесение на поверхность многослойного зеркала-коллектора антиотражающего покрытия, а также создания на его поверхности дифракционной решетки из пирамид, подавляющих зеркальное отражение в глубоком ультрафиолетовом диапазоне за счет деструктивной интерференции [13]), необходимость в абсорбционных свободновисящих фильтрах отпала.

Точнее, некоторый дополнительный уровень фильтрации, достаточный на данный момент, обеспечивают в ЭУФ сканерах два пленочных элемента (см. рис. 2): пелликл и так называемый DGL

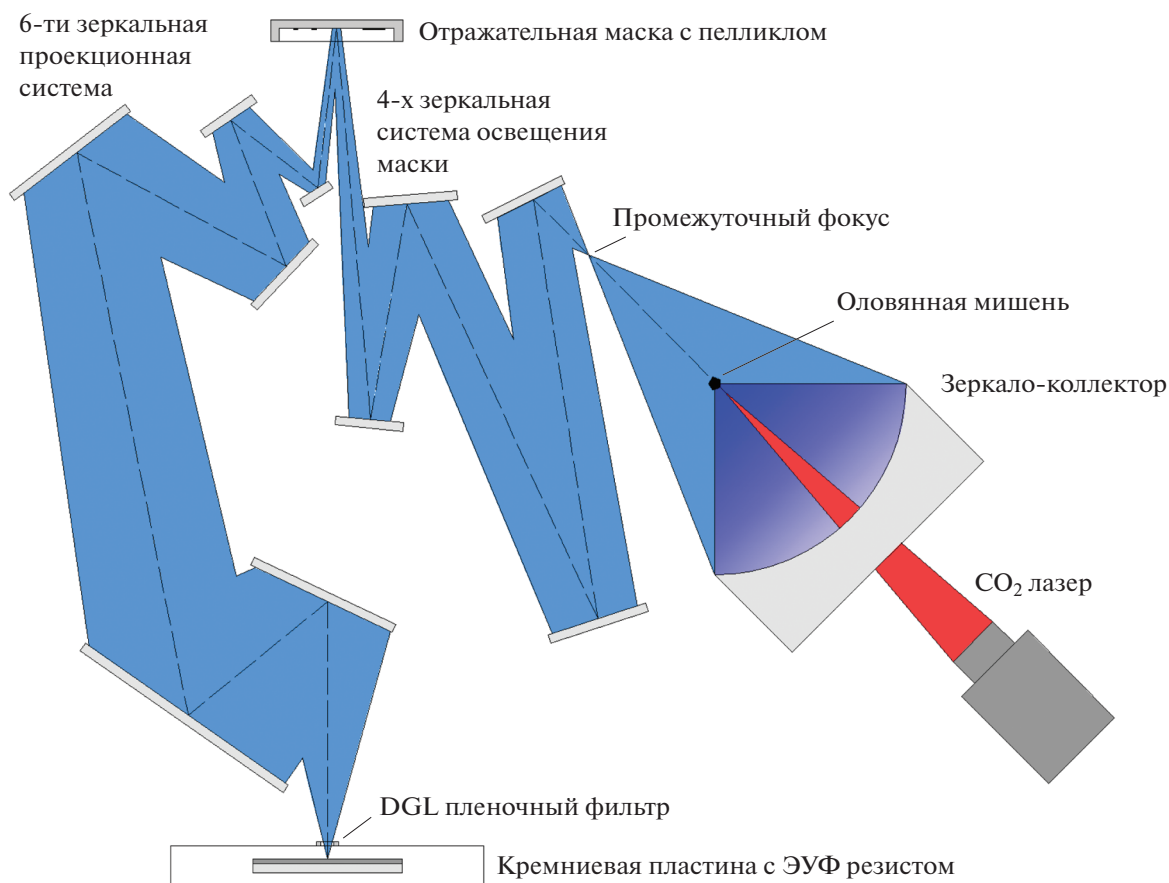


Рис. 2. Схематичное изображение оптической схемы современного ЭУФ сканера.

фильтр (тонкая пленка небольшого размера, отделяющая объем с проекционной оптикой от объема, где происходит засветка пластины с нанесенным на ее поверхность рентгенорезистом; служит для защиты элементов оптики от продуктов отгазовки резиста и, одновременно, как абсорбционный пленочный фильтр спектральной очистки) [14].

Исследования, посвященные разработке пленочных фильтров, были использованы в дальнейшем при разработке прототипов пелликов.

К 2013 г., когда в компании ASML полным ходом шла подготовка к началу поставок ЭУФ сканеров NXE:3300B, и стало понятно, что альтернативы защитным пленочным экранам нет, активизировались работы по разработке пелликов. Для тестирования были выбраны несколько лучших на тот момент кандидатов [15]: тонкие пленки поликристаллического кремния (*p*-Si) и предложенные в ИФМ РАН многослойные Mo/ZrSi₂ и Mo/NbSi₂ (это были, по сути, 25 нм толщины многослойные абсорбционные фильтры, обладающие высокой механической прочностью и стойкостью к окислению при нагреве, см. [11]). По результатам изучения оптических, механических и термических

свойств прототипов пелликов (образцов с меньшей апертурой), выбор был сделан в пользу *p*-Si пелликов.

Были выявлены следующие недостатки многослойных пленок. Во-первых, в силу особенностей метода изготовления (о чем подробнее будет сказано в разделе 4), Mo/ZrSi₂ и Mo/NbSi₂ прототипы пелликов оказываются ненапрянутыми или слабонапрянутыми на рамке, в результате чего уже при небольших перепадах давления между сторонами пленки происходит заметный прогиб пленки в центре. В спецификации к пелликам [16] есть ограничение на максимальную величину прогиба (500 мкм при 2 Па, см. табл. 1), что, по-видимому, вызвано опасениями, что пленка пелликла может при манипуляциях коснуться близкорасположенной поверхности контейнера для хранения и транспортировки маски, прилипнуть и повредиться [17]. Но уже на небольших по размеру образцах (с апертурой 60 × 60 мм) Mo/ZrSi₂ и Mo/NbSi₂ прогиб в центре при перепаде давления 2 Па составил величину около 500 мкм.

Кроме того, Mo/ZrSi₂ и Mo/NbSi₂ образцы уступили *p*-Si образцам по термической стойкости. При

Таблица 1. Спецификация (2014 г. [16]) требований, предъявляемых к пелликам в ЭУФ сканерах компании ASML

	Категория	Требования
Материал пелликла	Коэффициент пропускания на длине волны 13.5 нм	$\geq 90\%$ пропускания за один проход
	Размер	$110 \times 142 \text{ мм}^2$ (свободновисящая часть)
	Неравномерность коэффициента пропускания ЭУФ излучения по площади	Не более 0.4%
	Интенсивность падающего ЭУФ излучения в области засветки	5 Вт/см ² (ЭУФ мощность в промежуточном фокусе 250 Вт)
	Время жизни	>3000 засветок подложек
Пелликл + оправка	Расстояние до поверхности маски	$2 \pm 0.5 \text{ мм}$
	Максимальное ускорение	100 м/с ² при сканировании
	Максимальный прогиб пелликла	<0.5 мм при перепаде давления между сторонами пленки 2 Па
	Размер частиц загрязнений на поверхности пелликла	<15 мкм

нагреве с плотностью мощности, эквивалентной той, что падает на пелликл при использовании лазерно-плазменного источника ЭУФ излучения с мощностью в промежуточном фокусе более 40 Вт (мощность ЭУФ излучения в полосе 0.27 нм в окрестности длины волны 13.5 нм, собранная коллектором), часть многослойных Mo/ZrSi₂ и Mo/NbSi₂ образцов повреждались, в то время как *p*-Si образцы повреждались при плотности поглощенной мощности, эквивалентной использования ЭУФ источника с мощностью более 80 Вт в промежуточном фокусе [16]. Повреждения многослойных Mo/ZrSi₂ и Mo/NbSi₂ пленок при отжиге были вызваны кристаллизацией изначально аморфных слоев ZrSi₂ и NbSi₂ [18]. Так как свободновисящая пленка закреплена по периметру держателя, вызванное кристаллизацией уплотнение в области воздействия приводит к натяжению свободновисящей пленки, а при превышения предела прочности материала, — к ее разрушению.

По итогам тестирования выбор был сделан в пользу *p*-Si пелликов. Дальнейшие работы были направлены на разработку полномасштабных *p*-Si пелликов, методов их инспекции и аттестации, сборки и крепления к маске. В 2015 г. был создан полномасштабный (с областью, занимаемой свободновисящей пленкой $110 \times 144 \text{ мм}^2$) пелликл на основе *p*-Si с тонкими функциональными покрытиями [19].

Недостатком *p*-Si структур является относительно низкая термическая стойкость, а также низкая ИК излучательная способность (около 2% при толщине 50 нм) [15, 20]. Так как тепловое излучение — основной механизм охлаждения пелликов, то пленка с большей излучательной способностью нагреется до меньших температур при той же плотности поглощенной мощности. Было

продемонстрировано, что металлические пленки нанометровой толщины могут иметь относительно высокую (десять процентов) излучательную способность [21]. Так, добавление 2–3 нм толщины Ru покрытия на *p*-Si пелликл увеличило ИК излучательную способность пелликла более чем в 10 раз [16]. Использование покрытий, увеличивающих излучательную способность пелликла, оптимизация их композиций и толщины, позволило использовать *p*-Si пелликлы с лазерно-плазменными источниками, обеспечивающими мощность ЭУФ излучения вплоть до 250 Вт в промежуточном фокусе [22, 23].

Отметим, что помимо *p*-Si пелликов, рассматривался также вариант пелликов из SiN_x, разрабатывавшихся и реализованных в компании IBM [20, 24–25]. Пленки из нитрида кремния обладают более высокой термостойкостью, чем из поликристаллического кремния, однако вследствие того, что ИК излучательная способность у нитрида кремния еще меньше, SiN_x пелликлы (толщиной 54 нм, без покрытий) выдерживают примерно такую же тепловую нагрузку (менее 80 Вт эквивалентной мощности в промежуточном фокусе [26]), что и *p*-Si пелликлы. А из-за более высокого коэффициента поглощения, при той же толщине пленки SiN_x пелликлы заметно уступают *p*-Si пелликам по коэффициенту пропускания на длине волны 13.5 нм. Так, чтобы коэффициент пропускания SiN_x пелликла был более 90% на длине волны 13.5 нм, толщина пелликла должна быть меньше 16 нм [25]. Добавление нанометровых покрытий, увеличивающих излучательную способность, в принципе, позволяет применять SiN_x пелликлы с источниками ЭУФ излучения, имеющими 250 Вт в промежуточном фокусе. Но, вероятно, в силу указанных недостатков и отсутствия значимых пре-

имущества перед *p*-Si пелликлами, в установках проекционной литографии SiN_x пелликлы не использовались.

3. СОВРЕМЕННЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ ПЕЛЛИКЛЫ НА ОСНОВЕ СИЛИЦИДОВ МЕТАЛЛОВ И ВАРИАНТЫ БУДУЩИХ СТРУКТУР

Возрастание мощности лазерно-плазменных источников, использующихся в ЭУФ сканерах, а следовательно, плотности мощности поглощенного пелликлом излучения, заставляет разработчиков пелликлов искать термически более стойкие структуры.

В 2021 г. был реализован новый по структуре (композитный) и составу вариант полноразмерного пелликла на основе кристаллизованного силицида металла (вероятнее всего, молибдена) с коэффициентом пропускания более 88% на длине волны 13.5 нм и высокой термической стойкостью – пелликл способен работать с источниками ЭУФ излучения, обеспечивающими 400 Вт мощности в промежуточном фокусе [27]. По всей видимости, этот вариант будет основным на ближайшие годы. Путем оптимизации структуры и толщины пленки, удалось добиться коэффициента пропускания для полноразмерного образца более 90% на рабочей длине волны 13.5 нм.

Как уже было сказано ранее, пленки из аморфного силицидов циркония, ниобия и молибдена при вакуумном нагреве начинают кристаллизоваться при сравнительно невысоких температурах (~350–400°C) [18], что может приводить к их повреждению. В случае композитного пелликла, силицид металла находится в поликристаллическом состоянии, что позволяет пелликлу выдерживать нагрев до 800°C. Другое преимущество такой структуры по сравнению с *p*-Si заключается в том, что она обладает относительно высокой инфракрасной (ИК) излучательной способностью [27].

Среди вариантов структур пелликлов, способных работать при еще большей падающей мощности ЭУФ излучения, чем композитный пелликл, наибольший интерес представляют структуры на основе углерода: пористые пленки из углеродных нанотрубок [28], графитовые [29] и пленки на основе карбидов металлов [30].

Пористые пленки, состоящие из сети пересекающихся углеродных нанотрубок, обладают уникальными характеристиками. Они достаточно прочны, чтобы можно было изготовить полномасштабные пелликлы с коэффициентом пропускания более 97% на рабочей длине волны. Пленки из углеродных нанотрубок способны выдерживать получасовой вакуумный нагрев, эквивалентный тому, который будет испытывать пелликл при работе с источником ЭУФ излучения, обеспечива-

ющим 600 Вт излучения в промежуточном фокусе. Были проведены тестирования полномасштабных пелликлов из одностенных углеродных нанотрубок с коэффициентом пропускания до 97.7% в ЭУФ сканере ASML NXE:3300B, показавшие работоспособность и эффективность таких структур [28].

Но, как и все углеродсодержащие структуры, углеродные нанотрубки подвержены травлению вследствие нагрева в водородной среде сканера [2]. Дело в том, что для борьбы с загрязнением оптических элементов оловом, использующимся в качестве рабочего вещества в лазерно-плазменном источнике, а также избыточными в сканере углеродистыми загрязнениями, применяется водородная плазма низкого давления [31, 32].

Вызванная нагревом и воздействием водородной плазмы деградация материала приводит к потере механической прочности углеродсодержащих пленок. Одним из возможных решений проблемы является использование тонких защитных покрытий. Так, углеродные трубки могут быть покрыты нанометровой толщины слоями Mo или Ru [33].

Покрытия существенно снижают скорость деградации пелликла в водородной среде, но при этом снижается коэффициент пропускания на рабочей длине волны и возрастает рассеяние излучения [34]. Величина рассеяния и коэффициента пропускания зависят как от толщины покрытий, так и от размера и конфигурации нанотрубок. Поиски оптимальных параметров структуры из углеродных нанотрубок, которые удовлетворили бы всем требованиям, предъявляемым к пелликлам в установках проекционной ЭУФ литографии, продолжаются [35].

Как и пленки из углеродных нанотрубок, тонкие графитовые пленки (состоящие из нескольких выращенных друг на друге монослоев графена) способны выдерживать вакуумный нагрев до высоких температур [23]. Однако пленки графита оказались сравнительно хрупкими, что затрудняет изготовление полномасштабных графитовых пелликлов с высоким, близким к 90%, коэффициентом пропускания в рабочем диапазоне длин волн [36]. Также, в силу особенности методов изготовления графитовых пленок (роста на поликристаллической Ni или Cu подложке, которая одновременно является катализатором), может наблюдаться неоднородность коэффициента пропускания по площади пленки [37].

В недавно вышедшем обзоре [38] приведены данные по исследованию влияния водородной плазмы на структуру графитовых прототипов пелликлов при нагреве. Было показано, что деградация структуры наблюдается при нагреве в разреженной водородной плазме (2–3 Па) при температуре пленки более 500°C. Применение TiN покрытий, по-видимому, позволяет заметно снизить скорость деградации графитовой пленки.

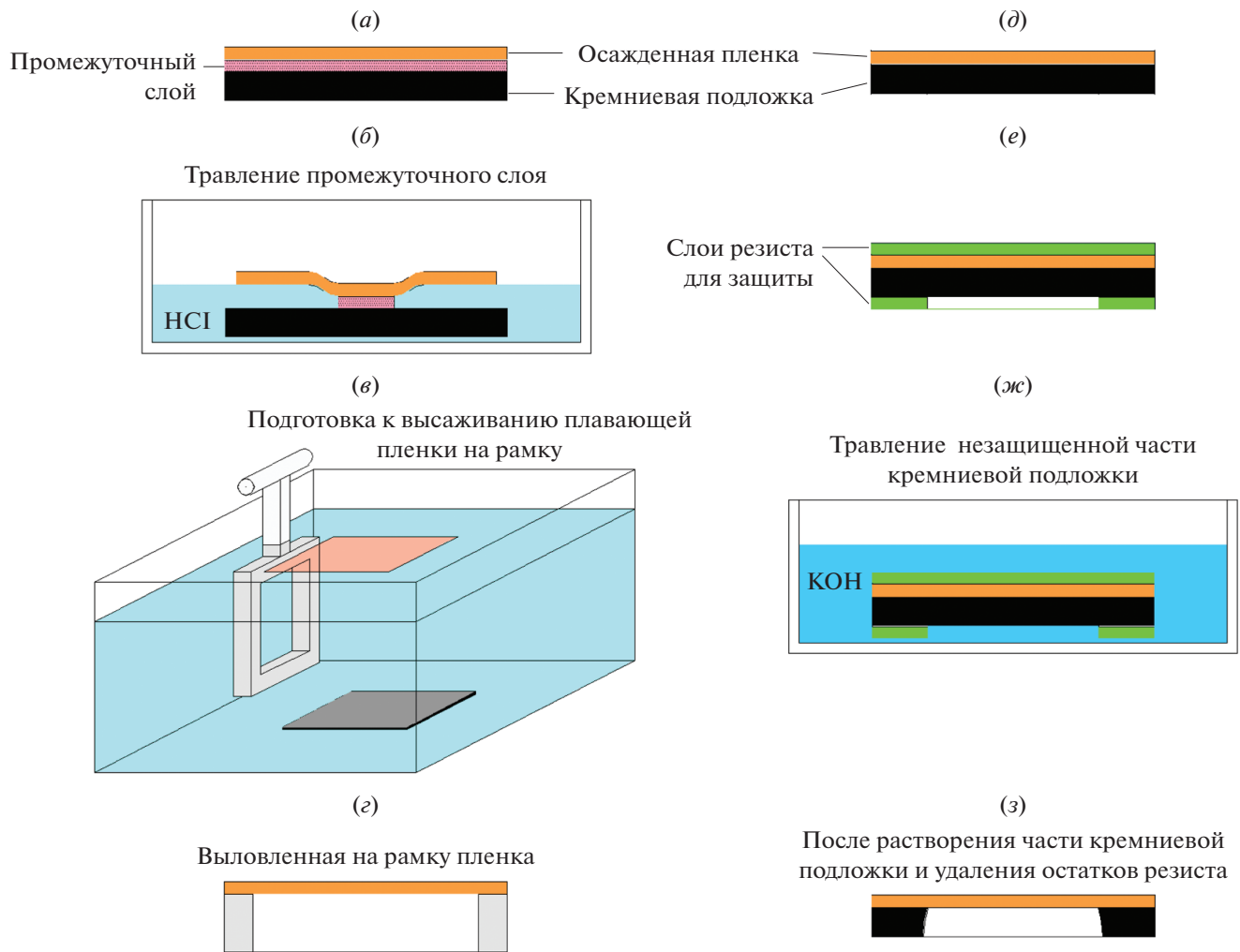


Рис. 3. Основные этапы изготовления свободновисящих тонких пленок с использованием промежуточного (жертвенного) слоя (слева, (а)–(г)) и путем травления кремниевой подложки (справа, (д)–(з)).

Помимо рассмотренных ранее углеродсодержащих структур, в качестве материала для пелликов интерес могут представлять карбиды прозрачных на рабочей длине волны металлов. В работе [30] исследованы свойства Mo_2C пленок. Изготовлены небольшие (1×1 см) образцы свободновисящих Mo_2C поликристаллических пленок толщиной 11 нм с коэффициентом пропускания более 90% на длине волны 13.5 нм. Продemonстрировано, что кристаллизованные Mo_2C пленки не деградируют в водородной плазме при нагреве до 800°C. С учетом высоких значений излучательной способности (около 0.38 при толщине 14 нм), Mo_2C пелликлы могли бы использоваться с ЭУФ источниками, обеспечивающими мощность более 400 Вт в промежуточном фокусе.

Недостатком карбидных структур является сравнительно высокий коэффициент поглощения, что может стать препятствием с точки зрения возможности изготовления полноразмерного пелликла с

коэффициентом пропускания более 90% на рабочей длине волны.

4. СРАВНЕНИЕ ПОДХОДОВ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ ПЕЛЛИКЛОВ

Пленки для ЭУФ пелликов как правило изготавливаются путем физического или химического осаждения материала на массивную подложку. Таким способом можно получить однородные сплошные пленки с минимальным количеством дефектов. Так как подложка поглощает ЭУФ излучение, то далее возникает необходимость освободить пленку от подложки. Существуют два основных подхода в изготовлении свободновисящих пленок (см. рис. 3). Во-первых, можно провести травление центральной части подложки. То есть, в подложке со стороны, противоположной той, на которую осаждена пленка, проделать окошко, удалив в нем весь материал подложки вплоть до

пленки. Оставшаяся по периметру часть подложки при этом будет служить рамкой, на которую опирается свободновисящая пленка [25]. Во-вторых, можно полностью отделить пленку от подложки. Освобожденная пленка затем высаживается на подходящую по размеру рамку. Отделить пленку от подложки можно растворив подложку целиком (если найдется подходящий селективный травитель, растворяющий подложку, но не взаимодействующий с пленкой, например, как в случае изготовления графитовых пленок [37]), либо растворив жертвенный (или как его еще называют, промежуточный) слой, который дополнительно осаждается на подложку (таким образом, жертвенный слой располагается между подложкой и пленкой) [10, 39]. Так как в качестве массивной подложки обычно применяется полированная кремниевая пластина, которая имеет высокую химическую стойкость, то в большинстве случаев оказывается проще подобрать материал жертвенного слоя и подходящий селективный травитель. Преимущество использования жертвенного слоя еще и в том, что время его растворения обычно существенно меньше времени растворения массивной подложки.

Отметим, что при изготовлении пористых пелликов из углеродных нанотрубок, может применяться технология, несколько отличная от описанных выше. В этом случае углеродные нанотрубки высаживаются из аэрозоля (взвешенного в газе частиц металлического катализатора) [40] или из раствора [41] на специально подобранную подложку (например, на фильтр из нитроцеллюлозы). На следующем этапе пленка переносится с нитроцеллюлозного фильтра на рамку для пелликла путем приведения их в контакт (рамка прижимается к фильтру с осажденной на него пленкой). После разъединения рамки и фильтра пленка остается на рамке вследствие того, что силы адгезии к рамке оказываются больше по величине, чем к нитроцеллюлозному фильтру.

В первом подходе (травления центральной части подложки) активно применяются отработанные полупроводниковые технологии (ионная имплантация, фотолитография и др.). В качестве подложки обычно используют стандартные двусторонне полированные кремниевые пластины. Используя методику травления кремния в водном растворе щелочи КОН (или иных травителей, таких как водный раствор гидроксид тетраметиламмония, водный раствор этилендиамина и пирокатехина), удастся получить тонкие Si_3N_4 или SiO_2 свободновисящие пленки [42] или свободновисящую пленку из $p\text{-Si}$, закрытую с обеих сторон слоями Si_3N_4 (и/или SiO_2) [43].

Изготовление сверхтонких свободновисящих пленок больших апертур — не простая технологическая задача. Проблемы, которые приходилось решать при изготовлении пелликов в первом подхо-

де, хорошо проиллюстрированы на примере изготовления SiN пелликов [25]. Вследствие хрупкости сверхтонкой пленки, такие воздействия, как схлопывание пузырьков водорода, образующихся при травлении кремниевой подложки, поверхностное натяжение воды при вытаскивании пелликла из водного раствора, вибрации и др. могут разрушить пленку.

Схожие проблемы возникают и при втором подходе. Так, например, когда в качестве жертвенного слоя применяется слой активного металла, а в качестве жидкого травителя — водный раствор кислот, в процессе растворения жертвенного слоя выделяются пузырьки водорода, которые при схлопывании могут повредить сверхтонкую пленку.

В отличие от первого подхода, пленка, как правило, не погружена в жидкий селективный травитель, а вместе с подложкой плавает на его поверхности. После отделения от подложки пленка остается плавать на поверхности жидкости. Чтобы высадить пленку на рамку, необходимо, погрузив в жидкость рамку, подвести ее под пленку, подцепить пленку за край рамки и вытащить рамку из жидкости. Поверхностное натяжение со стороны жидкости, которое нужно преодолеть, чтобы высадить пленку на рамку, может ее повредить. Без дополнительного упрочнения, выловить сверхтонкую пленку большой апертуры таким способом не представляется возможным. Проблема в большинстве случаев решается нанесением дополнительного упрочняющего слоя (например, слоя полистирола толщиной ~ 100 нм [44]) на поверхность пленки. Слой полистирола добавляется на всю поверхность пелликла до этапа отделения пленки от подложки. После растворения жертвенного слоя пленка с упрочняющим слоем высаживается на рамку. Далее слой упрочняющего полимера нужно удалить, чтобы обеспечить высокий коэффициент пропускания пелликла в рабочем диапазоне длин волн. Для этого можно окунуть пелликл целиком в растворитель полимера, но тогда при вытаскивании сверхтонкой пленки из раствора необходимо решать те же проблемы, что и при вытаскивании пленки из травителя в первом подходе. Менее травматичный путь заключается в разложении и улетучивании компонент полистирола под воздействием ультрафиолетового излучения (на воздухе или в кислородной среде). Для этого пленку помещают на некоторое время (несколько часов) под воздействие излучения ртутных ламп [45]. В принципе, возможен иной вариант, при котором упрочняющая пленка удаляется в процессе сублимации, как, например, в случае упрочняющего слоя из камфоры [36].

С точки зрения возможности изготовления пелликов из разных материалов, оба подхода имеют ограничения. Материал пелликла не должен взаимодействовать с жидким травителем (взаимодей-

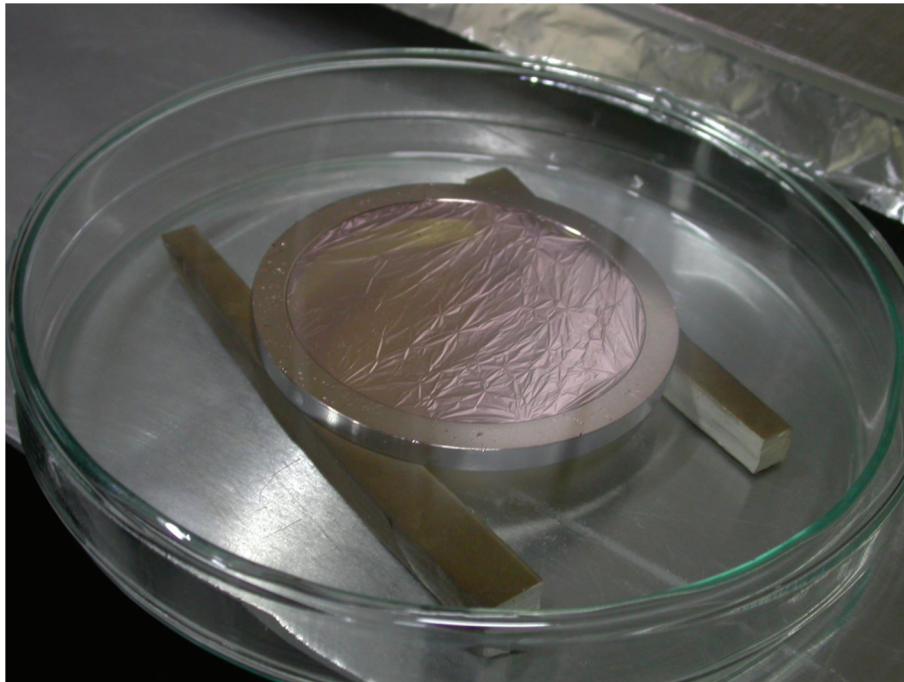


Рис.4. Прототип Si пелликла, изготовленный с применением жертвенного слоя, толщиной 50 нм на кольце с апертурой 80 мм.

ствие, в принципе, допускается, но в этом случае необходимо избежать прямого контакта пленки с травителем, для чего пленка дополнительно покрывается защитными слоями из химически стойких материалов). В целом, второй подход допускает больше вариаций с точки зрения возможных материалов пленок, так как для растворения полимерного или металлического жертвенного слоя, как правило, нет необходимости использовать растворители с высокой химической активностью. В первом же подходе, где в качестве подложек обычно применяются пластины кремния, для травления окошек в подложке требуется более агрессивная химия.

С точки зрения возможной структуры свободновисящих пленок, наоборот, первый подход более универсален. Во втором подходе нежелателен сильный нагрев подложки при осаждении пленок (а также на всех этапах до отделения пленки от подложки), так как материал из тонкого жертвенного слоя может начать взаимодействовать с материалами соседнего слоя и подложки, в результате чего его растворение может оказаться затруднено или невозможно (из-за образования нерастворимых соединений). Поэтому свободновисящие пленки, изготовленные с использованием жертвенного слоя (а следовательно, не подвергавшиеся заметному нагреву), имеют как правило аморфную или мелкокристаллическую структуру.

В первом же подходе отжиг не препятствует травлению массивной подложки, хотя процес-

сы взаимодиффузии и взаимодействия материала пленки и подложки могут негативно влиять на коэффициент пропускания пленочной структуры. Более существенным препятствием в получении поликристаллических пленочных структур тут является появление в пленке после отжига значительных внутренних напряжений, вызванных структурной перестройкой пленки, а также отличием коэффициентов термического расширения пленки и подложки. Чтобы избежать повреждений поликристаллических пелликлов, вызванных большими внутренними напряжениями, необходимо подбирать структуру пленки и условия отжига так, чтобы минимизировать величину внутренних напряжений.

Следует отметить еще следующую разницу: если в первом подходе можно подобрать условия, при котором пленка на отверстии будет натянута (то есть будет находиться под действием небольших, несколько сотен МПа, растягивающих напряжений [46]), то отделенная от подложки и высаженная на рамку пленка во втором подходе всегда оказывается ненатянутая (волнистая, см. рис. 4). В этом случае для того, чтобы изготовить пленку в натянутом состоянии, можно высадить ее на рамку большого размера, используя клей натянуть пленку по периметру рамки, а уже затем натянутую пленку приклеить к рамке меньшего диаметра [44]. Но, конечно, эта дополнительная операция сопряжена с рисками повредить сверхтонкую

пленку, несмотря на использование упрочняющего слоя.

Наличие волнистости и складок нежелательно в пелликах, так как они могут искажать однородность фронта проходящего сквозь них излучения [47]. Натянутый на отверстия пелликл меньше прогибается при приложении перепада давления, что при манипуляциях на воздухе (таких, например, как помещение пелликла с маской или их извлечения из контейнера для хранения и переноски) предотвращает касание близлежащих поверхностей и возможное повреждение пелликла [48].

Как можно видеть из приведенного выше, в целом первый подход больше подходит для массового производства натянутых на отверстия пелликов, так как большое время травления отверстия в кремниевой подложки может компенсироваться увеличением количества одновременно травящихся образцов [25].

Срок службы пелликла ограничен (обычно это 5–10 тыс. засветок масок), что связано с постепенным уменьшением его коэффициента пропускания (вызванного окислением поверхности под воздействием нагрева, осаждением углеводородов и иных загрязнений, присутствующих в атмосфере сканера). Со временем могут происходить изменения в механических свойствах пленок, вызванные, например, воздействием более высоких температур (из-за увеличения количества примесей в пелликах, увеличивается доля поглощенного им ЭУФ излучения, что, как правило, вызывает рост температуры, а следовательно, ускорение процессов деградации). Снижение механической прочности пленки, увеличение внутренних напряжений (вызванных, например, перекристаллизацией) может привести к повреждению пелликла.

Поэтому даже для одной литографической машины требуются сотни пелликов в год. По оценкам, в 2023 г. для обслуживания ЭУФ сканеров понадобится в общей сложности 12000 пелликов, в 2025 г. цифра может достичь 25000 штук/год [22].

5. ПЕЛЛИКЛЫ НА ДЛИНУ ВОЛНЫ 11.2 НМ

Продвижение проекционной литографии в сторону более коротких длин волн обусловлено увеличением предельной разрешающей способности проекционной схемы. Ключевыми факторами, определяющими выбор диапазона, являются наличие эффективного источника излучения и многослойных зеркал с высоким коэффициентом отражения. Среди кандидатов на длины волн короче 13.5 нм, наиболее перспективными считаются длины волн 6.7 и 11.2 нм [49]. На длине волны в районе 6.7 нм имеются La/B₄C и La/B многослойные зеркала с высоким коэффициентом отражения, в качестве источника излучения может использоваться лазерная плазма гадолиния, имеющая

пик вблизи 6.7 нм. Однако по ширине спектральной линии и по достигнутому коэффициенту отражения La/B₄C и La/B зеркальные покрытия заметно уступают Mo/Si зеркальным покрытиям, применяющимся на длине волны 13.5 нм [49]. Оценки конверсионной эффективности показывают, что лазерно-плазменный источник на основе Gd в несколько раз уступает по эффективности источнику на основе Sn, использующийся в современных сканерах [50].

В диапазоне длин волн около 11.2 нм может использоваться лазерно-плазменный источник на основе ксенона. В этой области длин волн располагается широкая интенсивная полоса излучения ксенона, максимум излучения которой располагается около длины волны 10.5 нм [51]. Также на длины волн за К краем поглощения бериллия ($\lambda > 11.1$ нм) разработаны Ru/Be зеркальные покрытия с Mo прослойками, имеющие высокий, более 70%, коэффициент отражения [52]. А на длины волн, короче К края поглощения бериллия, разрабатываются Ru/Sr многослойные покрытия с B₄C прослойками с коэффициентом отражения более 50% [53].

С учетом достигнутых результатов по разработке высокоотражающих многослойных зеркал и потенциальной возможности реализации эффективного лазерно-плазменного источника излучения на основе ксенона, длина волны 11.2 нм, на данный момент, выглядит более перспективной. В России в настоящее время прорабатывается вопрос о создании проекционной литографии на длине волны около 11.2 нм [54].

Здесь мы приведем те немногочисленные результаты исследований, касающиеся поиска и изучения свойств пленочных структур, которые могли бы использоваться в качестве пелликов и (или) спектральных фильтров в литографических установках с рабочей длиной волны 11.2 нм.

Среди материалов с наименьшим расчетным коэффициентом поглощения на длине волны в окрестности 11.2 нм можно выделить следующие (см. рис. 5): Be, Y, Zr, B₄C, C, Mo, Ru. Отметим, что на этих длинах волн кремний относительно непрозрачен, так как они лежат до L_{2,3} края поглощения кремния (длина волны около 12.4 нм). Вследствие этого Si содержащие пелликлы не подходят для использования на длине волны 11.2 нм.

Что касается углеродсодержащих пелликов, то они могут применяться как на длине волны 13.5 нм, так и на более коротких (вплоть до 4.4 нм — К края поглощения углерода), причем коэффициент пропускания с уменьшением длины волны при той же толщине пленки заметно возрастает.

Вследствие высокой химической активности, имеются сложности в изготовлении пленок на основе Y. Высокая же химическая активность соединений иттрия делает невозможным использование пленок на его основе в литографических

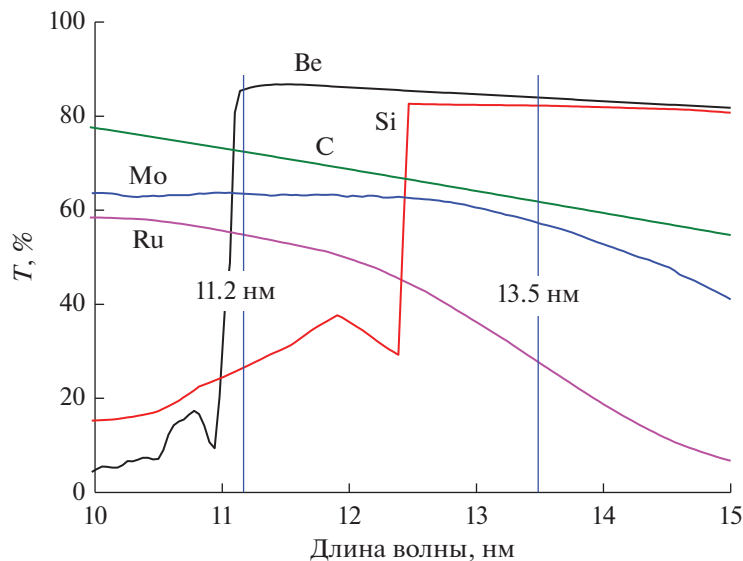


Рис. 5. Расчетный спектр пропускания однородных пленок толщиной 75 нм.

установках вследствие ожидающегося окисления и науглероживания при нагреве. Из соединений с иттрием в качестве материала для пелликов интерес может представлять оксид иттрия, который, судя по расчету, имеет коэффициент пропускания на длине волны 11.2 нм около 84% при толщине 25 нм.

Одним из самых прозрачных материалов в диапазоне длин волн 11.2 нм является бериллий. При сравнимой толщине, коэффициент пропускания бериллиевых пленок в этом диапазоне оказывается выше, чем кремниевых пленок на длине волны 13.5 нм. Но у бериллия имеются и недостатки. Во-первых, это токсичный материал, требующий особых условий при работе с ним. Во-вторых, это относительно активный материал, легко окисляющийся при нахождении на воздухе. Кроме того, пленки из бериллия довольно хрупки, а потому более приемлемым решением может быть многослойная структура, в которой слои бериллия чередуются со слоями более пластичных материалов.

В работе [55] изучались оптические и термические свойства Be-содержащих тонких пленок. В качестве пары к бериллию брались относительно прозрачные на длинах волн в окрестности 11.2 нм материалы (Zr, BeN_x, Mo, Ru).

На первом этапе отбирались композиции пленок, которые бы выдерживали кратковременный вакуумный нагрев при наиболее высокой плотности поглощенной мощности без повреждений. При этом использовались сравнительно толстые образцы свободновисящих пленок (толщинами 50–150 нм), что упрощало работу с ними. Лучшую термическую стойкость продемонстри-

ровала структура Be/BeN_x (с прослойкой из азотированного бериллия), которая выдержала получасовой вакуумный нагрев при плотности поглощенной мощности 1 Вт/см². Но у этой структуры было выявлено несколько недостатков. Во-первых, Be/BeN_x оказалась очень хрупкой. Во-вторых, слои BeN_x оказались химически менее стойкими, чем Be, и растворялись при контакте с селективным жидким травителем (водным раствором уксусной кислоты), который использовался при изготовлении свободновисящих пленок. Эти недостатки могут стать препятствием на пути изготовления полномасштабного Be/BeN_x пелликла.

Среди остальных из рассмотренных в работе вариантов структур, интерес представляют многослойные Mo/Be пленки. Измеренный коэффициент пропускания Be-2, (Mo-2/Be-2) × 7 пленки (7 периодов, толщины слоев Be и Mo по 2 нм, внешние слои — бериллий) толщиной 30 нм на длине волны 11.2 нм составил 87.4%. Пленка выдержала вакуумный отжиг (давление остаточных газов в вакуумном объеме ~10⁻⁸ Торр) в течение 24 ч при плотности поглощенной мощности 0.2 Вт/см², при этом коэффициент пропускания на длине волны 11.2 нм снизился с 87.4 до 86.4%. Исходя из этого, можно сделать вывод, что Mo/Be пелликлы должны выдерживать тепловую нагрузку, эквивалентную воздействию на пленку ЭУФ источника излучения мощностью до 40 Вт в промежуточном фокусе.

Более высокой термической стойкостью, а также стойкостью к окислению по сравнению с Be пленками обладают Ru пленки. Проведенные в ИФМ РАН исследования показали, что Ru пленки выдерживают многочасовой вакуум-

ный нагрев при плотности поглощенной мощности 0.8 Вт/см^2 . Но вследствие большего поглощения, для достижения того же коэффициента пропускания на длине волны 11.2 нм , что и для Ве пленки, толщина Ru пленки должна быть в разы меньше. Так, при толщине Ru пленки в 25 нм , измеренный коэффициент пропускания на длине волны 11.2 нм составил 82.5% . Пленки Ru заметно уступают по прочности Mo/Ve пленкам той же толщины. Можно ли изготовить ультратонкие бездефектные Ru пленки большой апертуры предстоит выяснить в дальнейшем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе сделан обзор исследований, посвященных использованию свободновисящих пленок в промышленных ЭУФ сканерах, работающих на длине волны 13.5 нм , в качестве защитных и подавляющих внеполосное излучение элементов (пелликов, спектральных фильтров). Показана эволюция структур пелликов (от кремний-содержащих к более термически стойким структурам на основе силицида металла), вызванная постоянным ростом ЭУФ мощности использующихся в сканерах лазерно-плазменных источников. Композитный пелликл из силицида металла применяется в современных ЭУФ сканерах с источниками, мощность которых превышает 250 Вт в промежуточном фокусе. Рассмотрены варианты термически более стойких углеродсодержащих пленочных структур, в том числе пористых пленок из углеродных нанотрубок. Пелликлы из этих структур могут заменить композитные пелликлы после достижения предельной для композитных материалов тепловой нагрузки, когда мощность ЭУФ излучения в промежуточном фокусе будущего литографа превысит 400 Вт .

Также сделан краткий обзор работ по исследованиям свойств пленок, имеющих высокий коэффициент пропускания на длине волны около 11.2 нм . Эта длина волны интересна тем, что может стать в будущем альтернативой длине волны 13.5 нм , на которой работают современные ЭУФ сканеры. Рассмотрены варианты многослойных и однослойных пленок на основе бериллия и рутения. Основным недостатком бериллийсодержащих пленок является их относительно невысокая термическая стабильность. Пленки из рутения обладают более высокой термической стабильностью, но из-за большего поглощения на рабочей длине волны практически невозможно достичь коэффициента пропускания 90% .

Проведено сравнение двух основных подходов, которые используются для изготовления свободновисящих сплошных пленок. Показано, что вариант изготовления с травлением центральной части подложки интересен возможностью получения слегка натянутой на отверстиях свободновисящей

пленки. Другой вариант изготовления с применением промежуточного слоя имеет преимущество, связанное с большим разнообразием материалов, из которых могут быть изготовлены свободновисящие пленки.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики микроструктур РАН (№ 0030-2021-0022) с использованием оборудования центра коллективного пользования “Физика и технология микро- и наноструктур” Института физики микроструктур РАН при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 21-72-30029).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hershel R.* Pellicle protection of integrated circuit (IC) masks // *Proc. SPIE.* 1981. V. 275. P. 23–28.
2. *Gallagher E.E., Vanpaemel J., Pollentier I., Zahedmanesh H., Adelman C., Huyghebaert C., Jonckheere R., Lee J.U.* Properties and performance of EUVL pellicle membranes // *Proc. SPIE.* 2015. V. 9635. P. 96350X.
3. *Lilienfeld P.* Application of Pellicles in Clean Surface Technology. In: *Treatise on Clean Surface Technology.* Springer, Boston, MA. 1987. P. 291.
4. *French R.H., Feldman J., Zumsteg F.C., Crawford M.K., Feiring A.E., Petrov V.A., Schadt III F.L., Wheland R.C., Gordon J., Zhang E.* Progress in materials development for 157 nm photolithography: photoresists and pellicles // *Semiconductor Fabtech.* 2001. V. 14. P. 167175.
5. *van Look L., Bekaert J.P.M., Laenens B., Vandenbergh G., Richter J., Bubke K., Peters J.H., Schreel K., Dusa M.V.* Pellicle contribution to optical proximity and critical dimension uniformity for 1.35 numerical aperture immersion ArF lithography // *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS.* 2011. V. 10. № 1. P. 013009.
6. *Mack C.A.* The lithography expert: Optical behavior of pellicles // *Microlithography World.* 2007. V. 16. № 4. P. 1–7.
7. *Rader D.J., Dedrick D.E., Beyer E.W., Leung A.H., Klebanoff L.E.* Verification studies of thermophoretic protection for EUV masks // *Proc. SPIE.* 2002. V. 4688. P. 182.
8. *Shroff Ya.A., Goldstein M., Rice B., Lee S.H., Ravi K.V., Tanzil D.* EUV pellicle development for mask defect control // *Proc. SPIE.* 2006. V. 6151. P. 615104.
9. *Ko K.-H., Kim E.-J., Kim J.-W., Park J.-T., Lim C.-M., Oh H.-K.* Effect of extreme-ultraviolet pellicle support to patterned mask // *Proc. SPIE.* 2012. V. 8322. P. 832230.
10. *Bibishkin M.S., Chkhalo N.I., Gusev S.A., Klunov E.B., Lopatin A.Y., Luchin V.I., Pestov A.E., Salashchenko N.N., Shmaenok L.A., Tsybin N.N., Zuev S.Y.* Multilayer Zr/Si filters for EUV lithography and for radiation source metrology // *Proc. SPIE.* 2008. V. 7025. P. 702502.

11. Chkhalo N.I., Drozdov M.N., Klunov E.B., Lopatin A.Ya., Luchin V.I., Salashchenko N.N., Tsybin N.N., Sjmaenok L.A., Banine V.E., Yakunin A.M. Free-standing spectral purity filters for extreme ultraviolet lithography // J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS. 2012. V. 11. № 2. P. 021115.
12. van de Kerkhof M.A., Liu F., Meeuwissen M., Zhang X., Bayraktar M., de Kruif R.C., Davydova N.V. High-power EUV lithography: spectral purity and imaging performance // J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS. 2020. V. 19. № 3. P. 033801.
13. Huang Q., de Boer M., Barreaux J., van der Meer R., Louis E., Bijkerk F. High efficiency structured EUV multilayer mirror for spectral filtering of long wavelengths // Opt. Express. 2014. V. 22. № 16. P. 19365–19374.
14. van de Kerkhof M., Jasper H., Levasier L., Peeters R., van Es R., Bosker J.-W., Zdravkov A., Lenderink E., Evangelista F., Broman P., Bilski B., Last T. Enabling sub-10nm node lithography: presenting the NXE:3400B EUV scanner // Proc. SPIE. 2017. V. 10143. P. 101430D.
15. Scaccabarozzi L., Smith D., Diago P.R., Casimiri E., Dzionkina N., Meijer H. Investigation of EUV pellicle feasibility // Proc. SPIE. 2013. V. 8679. P. 867904.
16. Zoldesi C., Bal K., Blum B., Bock G., Brouns D., Dhalluin F., Dzionkina N., Espinoza J., Hoogh J., Houweling S., Jansen M., Kamali M., Kempa A., Kox R., Kruif R., Lima J., Liu Y., Meijer H., Meiling H., Mil I., Reijnen M., Scaccabarozzi L., Smith D., Verbrugge B., Winters L., Xiong X., Zimmerman J. 3progress on EUV pellicle development // Proc. SPIE. 2014. V. 9048. P. 90481.
17. Ono Y., Kohmura K., Okubo A., Taneichi D., Ishikawa H., Biyajima T. Development of a novel closed EUV pellicle for EUVL manufacturing // Proc. SPIE. 2016. V. 9985. P. 99850B.
18. Зуев С.Ю., Лопатин А.Я., Лучин В.И., Салашенко Н.Н., Татарский Д.А., Цыбин Н.Н., Чхало Н.И. Исследование оптических, механических и термических свойств свободновисящих пленок на основе нанокomпозитных материалов MoSi_2N_x и ZrSi_2N_y // ЖТФ. 2019. Т. 89. № 11. С. 1680–1685.
19. Brouns D. Development and performance of EUV pellicles // Adv. Opt. Technol. 2017. V. 6. № 3–4. P. 221–227.
20. Pollentier I., Lee J.U., Timmermans M., Adelmann C., Zahedmanesh H., Huyghebaert C., Gallagher E.E. Novel membrane solutions for the EUV pellicle: better or not? // Proc. SPIE. 2017. V. 10143. P. 101430L.
21. van Zwol P.J. Emissivity of freestanding membranes with thin metal coatings // J. Appl. Phys. 2015. V. 118. P. 213107.
22. Salmaso G., Maas R. A new generation EUV pellicle to enable future EUV lithographic nodes at enhanced productivity // Proc. SPIE. 2021. V. 11854. P. 118540R.
23. van Zwol P.J., Nasalevich M., Voorthuijzen W.P., Kurganova E., Notenboom A., Vles D., Peter M., Symens W., Giesbers A.J.M., Klootwijk J.H., van de Kruijs R.W.E., van der Zande W.J. Pellicle films supporting the ramp to HVM with EUV // Proc. SPIE. 2017. V. 10451. P. 104510O.
24. Nasalevich M., van Zwol P.J., Abegg E., Voorthuijzen P., Vles D., Peter M., van der Zande W., Vermeulen H. Researching new EUV pellicle films for source powers beyond 250 watts // Proc. SPIE. 2016. V. 10032. P. 10032L.
25. Goldfarb D.L. Fabrication of a full-size EUV pellicle based on silicon nitride // Proc. SPIE. 2015. V. 9635. P. 96350A.
26. Jang J., Shin H.-J., Wi S.J., Kim H.N., Lee G.S., Ahn J. Investigation of the Mechanical/Thermal Properties of Nano-Scale Silicon Nitride Membranes // Kor. J. Met. Mater. 2019. V. 57. № 2. P. 124.
27. van de Kerkhof M., Klein A., Vermeulen P., van der Woort T., Donmez I., Salmaso G., Maas R. High-transmission EUV pellicles supporting >400W source power // Proc. SPIE. 2022. V. 12051. P. 120510B.
28. Bekaert J., Gallagher E., Jonckheere R., van Look L., Aubert R., Nair V.V., Timmermans M.Y., Pollentier I., Hendrickx E., Klein A., Yeğen G., Broman P. CNT pellicles: Imaging results of the first full-field EUV exposures // Proc. SPIE. 2021. V. 11609. P. 11609Z.
29. Kim M.J., Jeon H.C., Chalykh R., Kim E., Na J., Kim B.-G., Kim H., Jeon C., Kim S.-G., Shin D.-W., Kim T., Kim S., Lee J.H., Yoo J.-B. Study of nanometer-thick graphite film for high-power EUVL pellicle // Proc. SPIE. 2016. V. 9776. P. 97761Z.
30. Kim Y., Seong K., Lee D., Moon S., Kim H.-M., Kim H., Kim S.-G., Ahn J. Feasibility of nanometer-thickness molybdenum carbide film for extreme ultraviolet lithography pellicle // Proc. SPIE. 2022. V. 12292. P. 122920H.
31. Beckers J., van de Ven T., van der Horst R., Astakhov D., Banine V. EUV-Induced Plasma: A Peculiar Phenomenon of a Modern Lithographic Technology // Appl. Sci. 2019. V. 9. P. 2827.
32. Braginsky O.V., Kovalev A.S., Lopaev D.V., Malykhin E.M., Rakhimova T.V., Rakhimov A.T., Vasilieva A.N., Zyryanov S.M., Koshelev K.N., Krivitsun V.M., van Kaampen M., Glushkov D. Removal of amorphous C and Sn on Mo:Si multilayer mirror surface in Hydrogen plasma and afterglow // J. App. Phys. 2012. V. 111. P. 093304.
33. Lee J.U., Vanpaemel J., Pollentier I., Adelmann C., Zahedmanesh H., Huyghebaert C., Timmermans M., De Volder M., Gallagher E. Introducing the EUV CNT pellicle // Proc. SPIE. 2016. V. 9985. P. 99850C.
34. Pollentier I., Timmermans M.Y., Huyghebaert C., Brems S., Gallagher E.E. The EUV CNT pellicle: balancing material properties to optimize performance // Proc. SPIE. 2020. V. 11323. P. 11323G.
35. Timmermans M.Y., Pollentier I., Korytov M., Nuytten T., Sergeant S., Conard T., Meersschaet J., Zhang Y., Dialameh M., Alaerts W., Jazaeri E., Spampinato V., Franquet A., Brems S., Huyghebaert C., Gallagher E.E. CNT EUV pellicle tunability and performance in a scanner-like environment // Proc. SPIE. 2021. V. 11609. P. 116090Y.
36. Nam K.-B., Hu Q., Yeo J.-H., Kim M.J., Yoo J.-B. Fabrication of a $100 \times 100 \text{ mm}^2$ nanometer-thick graphite pellicle for extreme ultraviolet lithography by a peel-off and camphor-supported transfer approach // Nanoscale Adv. 2022. V. 4. P. 3824–3831.
37. Hu Q., Kim S.-G., Nam K.-B., Yeo J.-H., Kim T.-S., Kim M.-J., Yoo J.-B. A way to improve the uniformity of nanometer-thickness graphite film synthesized on polycrystalline Ni substrate: From large grain to small grain // Carbon. 2019. V. 144. P. 410–416.
38. Choi H.W., Nam K.-B., Shin D.-W. Graphite Pellicle: Physical Shield for Next-Generation EUV Lithography

- Technology // Adv. Mater. Interfaces. 2023. V. 10. № 10. P. 2202489–1–15.
39. Хантер В.Р. Изготовление свободных металлических пленок и их применение в качестве светофильтров для крайней ультрафиолетовой области спектра. Физика тонких пленок. М.: Мир. 1977. Т. VII. С. 52.
 40. Nasibulin A.G., Kaskela A., Mustonen K., Anisimov A.S., Ruiz V., Kivistö S., Rackauskas S., Timmermans M.Y., Pudas M., Aitchison B., Kauppinen M., Brown D.P., Okhotnikov O.G., Kauppinen E. I. Multifunctional free-standing single walled carbon nanotube films // ACS Nano. 2011. V. 5. № 4. P. 3214–3221.
 41. Lima M.D., Ueda T., Plata L., Yang Y., Le V., Keller N., Huynh C., Harada T., Kondo T. Ultra-low density, nanostructured free-standing films for EUV Pellicles // Proc. SPIE. 2020. V. 11517. P. 1151709.
 42. Alvi P.A., Lourembam B.D., Deshwal V., Joshi B.C., Akhtar J. A process to fabricate micro-membrane of Si_3N_4 and SiO_2 using front-side lateral etching technology // Sensor Review. 2006. V. 26. № 3. P. 179–185.
 43. Lee S.H., Kim D.H., Yang H.-D., Kim S.-J., Shin D.-W., Woo S.H., Lee H.J., Seung H.M., Lee S.-K., Lee G.-S., Park J.-G. Thin Transparent Single-Crystal Silicon Membranes Made Using a Silicon-on-Nitride Wafer // J. Korean Phys. Soc. 2008. V. 53. № 2. P. 579–583.
 44. Chkhalo N.I., Kluev E.B., Lopatin A.Ya., Luchin V.I., Salashchenko N.N., Sjmaenok L.A., Tsybin N.N. Study of heat induced changes in elastic properties of multilayer Mo/ZrSi₂ membranes // Thin Solid Films. 2017. V. 631. P. 93–98.
 45. Chkhalo N.I., Kuzin S.V., Lopatin A.Ya., Luchin V.I., Salashchenko N.N., Zuev S.Yu., Tsybin N.N. Improving the optical and mechanical characteristics of aluminum thin-film filters by adding thin cap layers // Thin Solid Films. 2018. V. 653. P. 359–364.
 46. Pellicle and pellicle assembly. Патент US11231646B2. 2022. Asml Netherlands B.V. <https://patents.google.com/patent/US11231646B2>
 47. Kim G.-J., Kim I.-S., Lee S.-G., Yeung M., Kim M.-S., Park J.-G., Oh H.-K. Influence of a wrinkle in terms of critical dimension variation caused by transmission nonuniformity and a particle defect on extreme ultraviolet pellicle // J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS. 2017. V. 16. № 4. P. 041008.
 48. Ono Y., Kohmura K., Okubo A., Taneichi D., Ishikawa H., Biyajima T. Development of a novel closed EUV pellicle for EUVL manufacturing // Proc. SPIE. 2016. V. 9985. P. 99850B.
 49. Chkhalo N.I., Salashchenko N.N. Next generation nanolithography based on Ru/Be and Rh/Sr multilayer optics // AIP Advances. 2013. V. 3. P. 082130.
 50. Yin L., Wang H., Reagan B.A., Baumgarten C., Gullikson E., Berrill M., Shlyaptsev V.N., Rocca J.J. 6.7-nm Emission from Gd and Tb Plasmas over a Broad Range of Irradiation Parameters Using a Single Laser // Phys. Rev. Applied. 2016. V. 6. P. 034009.
 51. Нечай А.Н., Перекалов А.А., Салащенко Н.Н., Чхало Н.И. Эмиссионные спектры тяжелых инертных газов Kr, Xe в диапазоне 3–20 nm при импульсном лазерном возбуждении с использованием различных газовых струй в качестве мишеней // Оптика и спектроскопия. 2021. Т. 129. № 3. С. 166.
 52. Smertin R.M., Chkhalo N.I., Drozdov M.N., Garakhin S.A., Zuev S.Yu., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Yunin P.A. Influence of Mo interlayers on the microstructure of layers and reflective characteristics of Ru/Be multilayer mirrors // Opt. Express. 2022. V. 30. № 26. P. 46749–46761.
 53. Shaposhnikov R.A., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Chkhalo N.I., Zuev S.Yu. Highly reflective Ru/Sr multilayer mirrors for wavelengths 9–12 nm // Opt. Letters. 2022. V. 47. № 17. P. 4351–4354.
 54. Chkhalo N.I., Malyshev I.V., Pestov A.E., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Toropov M.N., Soloviev A.A. Problems in the application of null lens for precise measurements of aspheric mirrors // Appl. Opt. 2016. V. 55. № 3. P. 619–625.
 55. Зув С.Ю., Лопатин А.Я., Лучин В.И., Салащенко Н.Н., Татарский Д.А., Цыбин Н.Н., Чхало Н.И. Сравнительное исследование термостойкости пелликов на основе бериллия // ЖТФ. 2022. Т. 92. № 1. С. 92–99.