

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ НАНОЛИТОГРАФИИ

© 2009 г. А. Б. Бельский*, канд. техн. наук; М. А. Ган**, доктор техн. наук;
И. А. Миронов***, канд. хим. наук; Р. П. Сейсян****, доктор физ.-мат. наук

* ОАО “Красногорский завод им. С.А. Зверева”, г. Красногорск, Московская обл.
E-mail: postbox@zenit.istra.ru

** НПК “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург
E-mail: gan@mail.wplus.net

*** Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения ВНИИ
“ГОИ им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург
E-mail: mironovi@goi.ru

**** Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: seis@ffm.ioffe.ru

Рассмотрены принципы создания высокоразрешающих проекционных фотолитографических объективов и требования к оптическим материалам для них. Показано, что одним из наиболее перспективных материалов для создания объективов для фотолитографии на длинах волн 248 и 193 нм является флюорит. Рассмотрены перспективы развития линзовых проекционных объективов с высокой числовой апертурой, современное состояние технологии производства, а также методы аттестации основных оптических параметров флюорита фотолитографического качества. Изготовлены и аттестованы кристаллы флюорита диаметром до 300 и толщиной до 50 мм. Кристаллы, выращенные по разработанной технологии, имеют высокую прозрачность (99,92–99,96% на $\lambda = 193$ нм) и высокую оптическую однородность ($\Delta n = (1-4) \times 10^{-6}$), малое двулучепреломление ($\delta = 0,5-2,0$ нм/см). В кристаллах практически отсутствует люминесценция. Даны предложения по развитию фотолитографической оптики.

Ключевые слова: нанолитография, фотолитографический проекционный объектив, фторид кальция.

Коды OCIS: 220.0220, 220.3740

Поступила в редакцию 18.05.2009

Введение

Фундаментальной физической основой развития микроэлектроники на протяжении более чем полувекового периода ее развития был и остается волновой процесс переноса изображения. Начиная с 80-х годов прошлого века – это проекционный перенос с уменьшением масштаба и длины волны используемого излучения. Процесс уменьшения длины волны достиг глубокого ультрафиолетового (DUV)¹ диапазона и приостановился на длине волны эксимерного ArF-лазера ($\lambda = 193$ нм), предполагавшегося освоения для фотолитографии эксимерного F₂-лазера не состоялось, ввиду причин, которые мы рассмотрим ниже. Тем не менее это не остановило темпов прогрессивного уменьшения критического размера (CD)² интегральных схем (ИС), который иногда называют стандартом ИС. Он последовательно

снижался все предыдущие годы (130–110–90–65–45–32 нм), достигнув в настоящее время 45 нм в передовом промышленном производстве [1, 2]. Таким образом, оптическая фотолитография еще в 2004–2005 годах успешно преодолела “нанобарьер” и обеспечила разрешение элементов, существенно меньших 100 нм [3]. На повестку дня поставлен вопрос о промышленном освоении CD = 32 и 22 нм [4]. Обратим внимание, что при этом воспроизводимый элемент топологического микрорисунка оказывается в 4–6 раз меньше длины волны используемого излучения.

Рассмотрим основные факторы, которые позволили с помощью оптической литографии успешно преодолеть “нанобарьер”.

Ключевым элементом оптической фотолитографии является фотолитографический объектив. За рассматриваемое время усилиями разработчиков оптических систем и новых оптических материалов он достиг необыкновенного совершенства. Он включает в себя несколько

¹ DUV – deep ultra-violet.

² CD – critical dimension.

десятков оптических элементов, максимальный размер которых превышает 300 мм в диаметре, и при оптической длине более одного метра обеспечивает практически безабберационное формирование изображения в поле около 30 мм диаметром при числовой апертуре (NA)³, превышающей 0,9. Следует отметить, что повышение числовой апертуры проекционных объективов для литографии сопровождалось неуклонным снижением технологических потерь, по-видимому, за счет все более широкого внедрения интерференционного контроля на рабочей длине волны, компьютеризированных методов сборки, исследования и доводки проекционных объективов и их элементов как в процессе изготовления, так и на этапе эксплуатации [5–7].

Следующим фактором, предопределившим такой прогресс, явилось использование эксимерных лазерных источников света: в начале 90-х – KrF-лазер ($\lambda = 248$ нм), затем (и по настоящее время) – ArF-лазер ($\lambda = 193$ нм). Эти лазеры в соединении с оптической системой достигли весьма высокого совершенства: при высочайшей стабильности пучка ширина линии излучения измеряется десятками долями пикометра [8, 9]. Разработка более коротковолнового эксимерного F₂-лазера для фотолитографии ($\lambda = 157$ нм) была выполнена [10], но дальнейшие работы, по-видимому, были приостановлены ввиду существенных успехов иммерсионной фотолитографии.

Работа с размерами критического элемента изображения меньше длины, определяемой дифракционным пределом по Рэлею–Аббе, потребовала в первую очередь применения методов коррекции эффекта оптической близости, сводившихся к созданию рисунка на фотошаблоне, упреждающего его искажения при печати в таких условиях [11–13]. Это позволило работать с элементами изображения меньше дифракционного предела, но при этом существенно усложнило фотошаблон.

Другим фактором, прочно вошедшим в практику фотолитографической технологии, стало создание фотошаблонов с фазосдвигающими вставками [11–13]. Существуют не менее пяти приемов введения корректирующего фазового сдвига вблизи краевых участков микрорисунка на фотошаблоне, что требует коррекции волнового фронта и по третьей координате. Это еще более существенно усложнило изготовление фотошаблонов и заметно увеличило их стоимость.

Радикальным шагом оказалось предложенное в 2002 г. введение иммерсионной жидкости в про-

³ NA – numerical aperture.

межутки между выходной поверхностью изображающего объектива и полупроводниковой пластиной [3]. Это привело к возрастанию числовой апертуры в n раз. Поначалу в качестве иммерсионной жидкости применялась очищенная и обезгаженная вода, имеющая достаточную прозрачность на $\lambda = 193$ нм и коэффициент преломления $n = 1,44$. В дальнейшем прогнозируется переход к “супериммерсии”, которую обеспечат иммерсионные жидкости с n , достигающим 1,75 [13]. Однако применение процесса иммерсирования приводит к заметному уменьшению выхода годных изделий, связанному с выходом из жидкости пузырьков растворенного в ней атмосферного газа. Это объясняет тот факт, что фирма Интел (один из ведущих производителей ИС) отказывалась от введения иммерсионного процесса вплоть до реализации стандарта CD = 45 нм.

Наконец, наиболее радикальным способом “преодоления” дифракционного предела и продвижения к CD < 32 нм оказывается введение двойного экспонирования (DE/DP)⁴, которое имеет по крайней мере две разновидности [4, 13, 14]. Это двойное экспонирование с использованием одного и того же слоя фоторезиста (DE) и двойное экспонирование с двумя литографическими циклами (DP). В обоих случаях применяются два различных взаимодополняющих фотошаблона. Понятно, что DE существенно более экономично, но менее радикально чем DP, значительно удлиняющий технологический процесс. С другой стороны, следует обратить внимание на то обстоятельство, что эти технологии становятся возможными только при наличии высококонтрастного и нелинейного фоторезиста. Такой резист был создан при исследованиях новых фоторегистрирующих сред, способных работать с коротковолновым излучением [12, 13]. Это так называемый фоторезист с химическим усилением (CA резист)⁵, и все дальнейшие успехи технологии двойного экспонирования связаны с усовершенствованиями CA резиста, а также с технологией двухслойного резиста и силилирования. Эта технология позволила осуществить экспериментальную фотолитографию на излучении ArF-лазера с CD = 9 нм, что в 20 с лишним раз меньше длины волны экспонирующего излучения.

Правда, для этого необходимо двукратное применение двойного экспонирования в режиме DP, что приводит к удлинению производственного цикла и удорожает технологический процесс.

⁴ DE – double exposure, DP – double patterning.

⁵ CA резист – chemically amplified resist.

Таким образом, казалось бы, все задачи планарной технологии интегральных схем на обозримое будущее могут быть решены оптической литографией с применением излучения глубокого ультрафиолетового диапазона ($\lambda = 193$ нм). Но для более последовательного и детального обсуждения проблемы рассмотрим следующие два обстоятельства.

Обстоятельство первое. Существуют по крайней мере три альтернативы оптической литографии. Это электронно-лучевая литография (ЭЛЛ), наноимпринт-литография (НИЛ) и экстремально-ультрафиолетовая литография (ЭУФЛ). Согласно анализу SEMATECH [15] существенного вклада в производственные мощности ни от ЭЛЛ, ни от НИЛ вплоть до 2016 г. не ожидается, и основная конкуренция развернется между оптической литографией в режиме DP и EUV⁶ фотолитографией.

Детальный анализ ситуации [16] показывает, что вплоть до 2012–13 гг. для CD = 32 нм явное преимущество остается за DUV литографией в режиме иммерсии и DP, однако с 2014 г. и далее, при переходе к CD = 22 нм, преимущество оказывается на стороне EUV фотолитографии. К этому времени предполагается завершение разработки источника EUV излучения, обеспечивающего мощность освещения маски 200 Вт и более в промежуточном фокусе. Это выравнивает производительность EUV сканера-степпера с производительностью современного ArF-литографа. Кроме того, EUV фотолитография не нуждается в весьма сложных и дорогих масках (стоимость комплекта масок для DUV более \$1M, почти в 5 раз выше, чем для EUV фотолитографии) и в дополнительных экспозициях с необходимыми дополнительными операциями. Оптическая литография на CD = 32 нм сохраняет свое преимущество, главным образом, за счет высоких капитальных затрат EUV технологии. Стоимость промышленного EUV сканера-степпера оценивается в \$89M – при \$53M для наиболее сложного варианта DUV литографии [17].

Обстоятельство второе. Современная ультрабольшая интегральная схема (УБИС), например микропроцессора, выполняется с применением около 30 слоев, требующих фотолитографии. Только порядка десяти первых слоев связаны с формированием приборной полупроводниковой структуры, остальные обеспечивают коммутацию с помощью слоев металла, разделенных диэлектриком [13].

При этом требования к разрешению фотолитографии падают с увеличением номера слоя

⁶ EUV – extreme ultra-violet.

коммутации. Высокопроизводительная линия включает в себя как минимум 10–15 фотолитографических установок. При этом вполне естественно, что ввиду существенной разницы в стоимости только нескольких самых первых литографий, нуждающихся в наивысшем разрешении, будут обеспечены самым высокоразрешающим инструментом, тогда как все последующие слои выгоднее исполнять с применением менее сложных и дорогих литографических установок. Отсюда следует, что независимо от сроков успешного внедрения более коротковолновой EUV литографии в промышленное производство DUV литография останется востребованной в современной микроэлектронике и это подтверждается прогнозом фирмы NIKON [18]. Влияние этих тенденций развития фотолитографии касается не только самых высокоразрешающих установок с высокоапертурными иммерсионными объективами, но и более длинноволновых ($\lambda = 248$ нм), которые за последние годы также преодолели “нанобарьер” [19].

Важнейшей проблемой при разработке современных фотолитографических объективов является выбор оптических материалов.

Для изготовления фотолитографического объектива необходим прозрачный в УФ области оптический материал с высокой оптической однородностью и высокой лазерной стойкостью.

Для длин волн в глубокой ультрафиолетовой области (248 и 193 нм) долгое время единственным подходящим материалом был так называемый плавленый синтетический “сухой” кварц, производство которого освоено фирмами CORNING и NIKON. Первые поколения фотолитографических объективов для этих длин волн делали из “сухого” кварца. В последние годы ведутся разработки “легированного” кварца, которые должны увеличить его световую стойкость.

Однако с начала 90-х годов прошлого века во всем мире были развернуты работы по созданию флюорита фотолитографического качества. Ранее препятствием к применению флюорита в фотолитографической оптике были малые размеры и блочная структура синтезируемых кристаллов, но в результате интенсивных научно-исследовательских и технологических работ была создана технология производства флюорита фотолитографического качества.

Фторид кальция для фотолитографии

Фторид кальция (флюорит) фактически оказался одним из наиболее пригодных материалов

для УФ фотолитографической оптики как с точки зрения требований к прозрачности и оптической однородности в DUV диапазоне, так и стойкости к воздействию излучения мощного УФ лазера.

Работы по созданию крупногабаритного флюорита фотолитографического качества и расчету фотолитографических объективов на его основе успешно ведутся в ГОИ им. С.И. Вавилова с начала 90-х гг. Разработаны программа автоматизированного проектирования оптических систем WinDEMOS [20] и программа моделирования фотолитографических процессов LITHOGRA [21]. Разработана оптическая система фотолитографического объектива на основе флюорита ФЕНИКС-248, формирующего изображение на длине волны эксимерного KrF-лазера с уменьшением $5\times$ и апертурой 0,65. Линейное поле зрения, в котором формируется изображение, имеет диаметр 30 мм, а качество изображения практически ограничено только дифракцией. Кроме того, в ГОИ им. С.И. Вавилова выполнены расчеты оптических проекционных систем на основе флюорита для эксимерного ArF-лазера, которые имеют апертуру 0,9 и 1,3 (для сухого и иммерсионного процессов соответственно) и обеспечивают формирование изображения с элементом разрешения 60 и 45–32 нм. Рассчитаны 4- и 6-зеркальные объективы для EUV литографии [22].

Оптическая схема одного из вариантов высокоапертурного объектива из флюорита для DUV литографии на длине волны эксимерного ArF-лазера показана на рис. 1.

Возможность использования флюорита в качестве основного материала для фотолитографических объективов основана на том, что кристаллы фторида кальция, выращенные по специальной технологии, не только обладают необходимым пропусканием, оптической однородностью и стойкостью на длине волны 193 нм, но кроме того, имеют дисперсию в 1,4 раза меньше чем кварц, что позволяет более эффективно использовать излучение эксимерного лазера.

“Внутреннее” двулучепреломление, обнаруженное при исследовании возможностей приме-

нения флюорита для $\lambda = 157$ нм, весьма мало на длинах волн 193 и 248 нм и при необходимости может быть скомпенсировано, например, путем сочетания кристаллов с различной кристаллографической ориентацией [23].

В основу разработанной в ГОИ технологии выращивания фторида кальция с высокими оптическими свойствами для DUV фотолитографии были положены следующие положения, вытекающие из многочисленных экспериментальных данных, полученных при выращивании как кристаллов фторидов, так и сапфира:

- напряжения возникают, если изменение температуры кристаллов происходит с такой скоростью, при которой структура кристалла не успевает придти в равновесное состояние;
- наличие больших градиентов температуры в кристаллах (особенно в радиальном направлении) способствует возникновению напряжений;
- напряжения в растущем кристалле зависят от характера осевого распределения температуры; теоретическая зависимость вида остаточных напряжений, возникающих в ходе роста кристаллов [24], показывает, что при линейном градиенте напряжения должны отсутствовать, при положительных отклонениях от линейности возникают напряжения сжатия на периферии и напряжения растяжения в центре, а при отрицательных отклонениях от линейности – напряжения растяжения на периферии и напряжения сжатия в центре; повторный нагрев (особенно в температурном поле с градиентом другого направления по сравнению с направлением градиента при росте) приводит к появлению малых (мозаика) или крупных (блоки) участков с различной ориентацией кристаллической решетки; длительный повторный отжиг в вакууме (особенно в открытом контейнере, т. е. при давлении пара ниже равновесного) приводит к нарушению стехиометрии, повышению концентрации дислокаций и точечных дефектов.

Эти положения послужили основой для разработки процесса выращивания ненапряженных кристаллов непосредственно в процессе выращивания без применения повторного нагрева с целью отжига кристаллов [25–27]. Для этого была использована печь с двумя нагревателями, в которой можно создавать оптимальное тепловое поле.

Экспериментально было обнаружено, что ненапряженные (0,5–2,0 нм/см) кристаллы получают при создании в печи теплового поля, обеспечивающего охлаждение кристаллизующего материала при линейном осевом градиенте

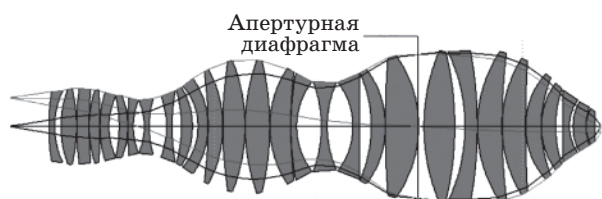


Рис. 1. Высокоапертурный фотолитографический объектив из флюорита.

20–50 °С/м и при отсутствии (или минимальном значении) радиального градиента в зоне охлаждения. За один технологический цикл выращивали от четырех до шести кристаллов фторида кальция диаметром 300 и высотой 70 мм с кристаллической ориентацией $\langle 111 \rangle$ при отклонении от заданной ориентации по всей площади кристалла не более 2°. Кристаллы, выращенные описанным способом, имеют высокую прозрачность (99,92–99,96% на $\lambda = 193$ нм) и высокую оптическую однородность ($\Delta n = (1-4) \times 10^{-6}$), малое двулучепреломление ($\delta = 0,5-2,0$ нм/см). В кристаллах практически отсутствует люминесценция, они имеют необходимую лазерную стойкость и полностью отвечают требованиям для создания оптических систем DUV фотолитографии.

Высокая лазерная стойкость и отсутствие люминесценции достигались благодаря использованию исходного сырья с содержанием микропримесей щелочных металлов, редкоземельных металлов и кислорода на уровне 0,1 ppm. Для удаления кислорода применялась предварительная термообработка сырья во фторирующей среде. Контроль качества термообработанного сырья проводился оптическим методом – по отсутствию локальных полос в спектрах пропускания, измеренных в DUV области спектра в образцах поликристаллического материала, полученного путем плавления в вакууме после предварительной термообработки во фторирующей среде.

Технология выращивания монокристаллов флюорита

Технологический процесс выращивания монокристаллов включает кристаллизацию из расплава и отжиг кристаллов с последующим охлаждением в вакуумной печи путем непрерывного перемещения тигля с расплавом из зоны кристаллизации в зону отжига при независимом регулировании режимов обеих зон.

В очищенный графитовый тигель помещают предварительно очищенный фторид кальция. Тигель помещают в ростовую установку с системой нагревателей, обеспечивающих образование двух зон: кристаллизации и отжига, разделенных между собой с помощью теплоизоляции и экрана. Тигель устанавливают на штоке перемещения привода с программным управлением. Установку герметизируют и вакуумируют до давления 5×10^{-6} мм рт. ст., после чего нагревают до нужных температур, регулируя мощность нагрева. В верхней зоне – зоне кристаллизации – температуру доводят до 1500 °С и выдерживают при этой

температуре в течение 30 ч, достигая тем самым полного расплавления шихты, гомогенизации и очистки от включений. Затем начинают медленное опускание тигля с расплавом со скоростью 1–3 мм/ч в зону отжига.

Между зонами кристаллизации и отжига поддерживается градиент температур 8–12 °С/см. Такой градиент обеспечивает отсутствие периферийного зарождения блоков и рост монокристалла на расположенную в дне тигля затравку требуемой ориентации.

Перемещение тигля из зоны кристаллизации в зону отжига происходит в течение 370–450 ч. Охлаждение проводят со скоростью 3 °С/ч до достижения температуры 900 °С и далее со скоростью 7 °С/ч до 300 °С. После этого нагрев отключают и происходит инерционное охлаждение всей установки, которое занимает около 70 ч.

Весь процесс выращивания кристаллов занимает, как правило, 45 дней.

Выход годных заготовок на стадии выращивания – 25%. Потери (75%) связаны с отбраковкой после контроля на наличие пузырей и включений в объеме, границ блоков, микроблочной разориентации, двулучепреломления, оптической однородности.

В НИТИОМ проводятся работы по созданию базы для производства отечественного особо чистого сырья для изготовления флюорита фотолитографического качества, которая обеспечит производство 1–2 т/год (и может быть увеличено до 10 тон/год).

Контроль и аттестации кристаллов флюорита

Существующие в настоящее время стандарты на оптический флюорит и методики измерений не позволяют проводить полную аттестацию материала с точки зрения его применения при создании УФ фотолитографических объективов. Поэтому нами совместно с НИИ “Оптоинформатика” СПбГУ ИТМО разработаны методики контроля оптических параметров флюорита для УФ фотолитографии, в том числе методики

- определения спектров люминесценции,
- измерения пропускания,
- измерения лучевой стойкости кристаллов флюорита,
- измерения оптической однородности,
- измерения показателя преломления флюорита,
- измерения топографии двулучепреломления и др.

Эти методики основаны на использовании эксимерного лазера COMPEX 102, высокоточного спектрофотометра PE Lambda 950 и ряда специально разработанных компьютеризированных приборов и установок.

В качестве примера на рис. 2 приведена топография деформации волнового фронта при контроле распределения оптической однородности в одной из заготовок оптического флюорита. При этом искажения, связанные с деформациями оптических поверхностей заготовки, вычитались. Контроль проводился на длине волны 633 нм. Оптическая неоднородность Δn в данной заготовке составила менее $2 \times 10^{-6} \text{ см}^{-1}$.

На рис. 3 приведены результаты регистрации спектра люминесценции образца изготовленного флюорита при возбуждении излучением эксимерного KrF-лазера.

На рис. 4. приведены типичные результаты измерения спектра пропускания образцов флюорита, показывающие практическое отсутствие линий или областей поглощения, которые могли бы снизить лучевую прочность материала.

Все изготовленные образцы оптического флюорита проходят контроль по разработанным методикам, что позволяет провести аттестацию и принять решение по их оптимальному использованию при создании УФ проекционно-осветительной системы.

Фотолитографический объектив

Фотолитографический объектив является ключевым элементом литографической установки. В качестве примера рассмотрим разработанную в рамках Российско-Белорусской программы

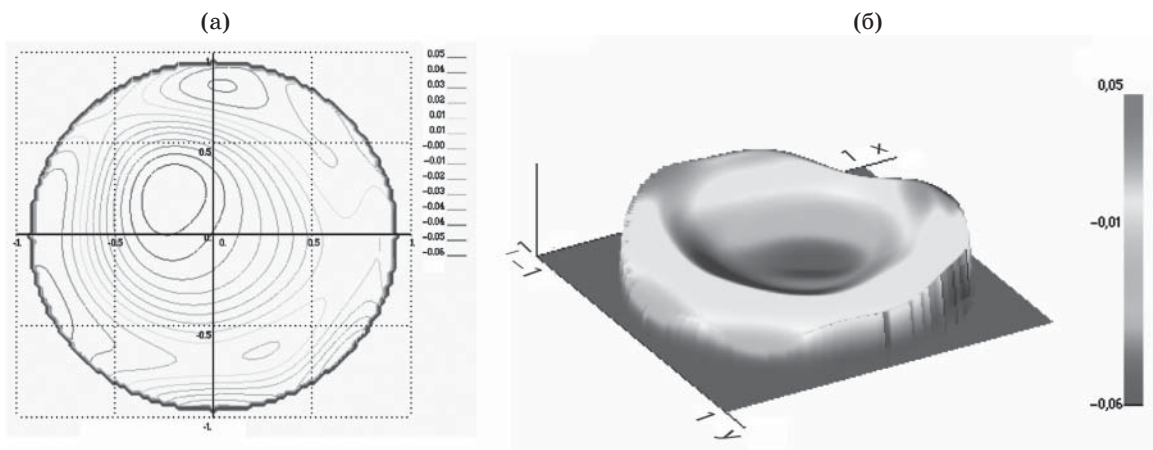


Рис. 2. Топография искажений волнового фронта, вносимого материалом заготовки флюорита. а – линии равного уровня, б – объемный график в долях длины волны, используемой при контроле (633 нм).

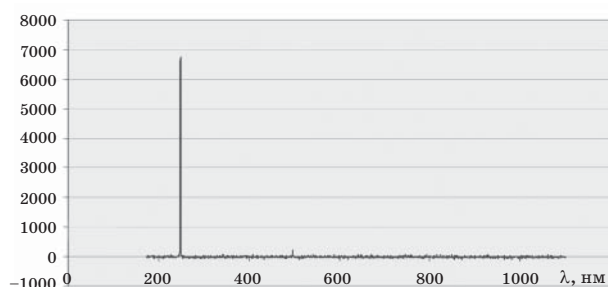


Рис. 3. Спектр люминесценции в относительных единицах. Пик на длине волны 248 нм вызван излучением возбуждающего KrF-лазера.

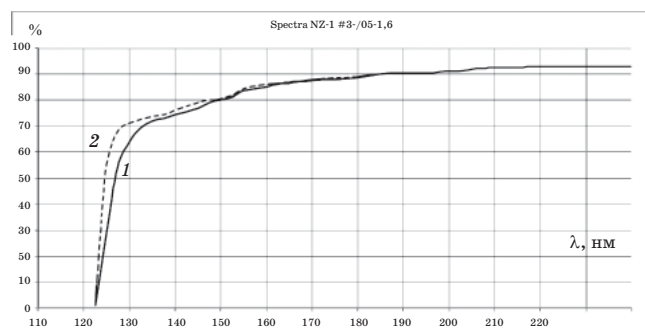


Рис. 4. Спектр пропускания образцов флюорита. Образцы вырезаны из различных частей заготовки толщиной 50 мм. 1 – верх заготовки, 2 – низ заготовки.

“Победа-2” оптическую систему и конструкцию фотолитографического проекционного объектива (ПО) ФЕНИКС-248, основные параметры которого были указаны выше. Общий вид УФ фотолитографического объектива ФЕНИКС-248 показан на рис. 5.

Разработана концепция непрерывной вычислительной поддержки при изготовлении проекционного объектива, основанная на использовании технических, программных средств и методов CALS⁷ технологий и включающая следующие этапы:

- Разработка электронной модели (ЭМ) проекционного объектива (оптические элементы и корпус) на стадии автоматизированного проектирования.
- Оптимизация объектива и корректировка ЭМ по результатам высокоточного измерения показателя преломления на рабочей длине волны и радиусов пробных стекол.

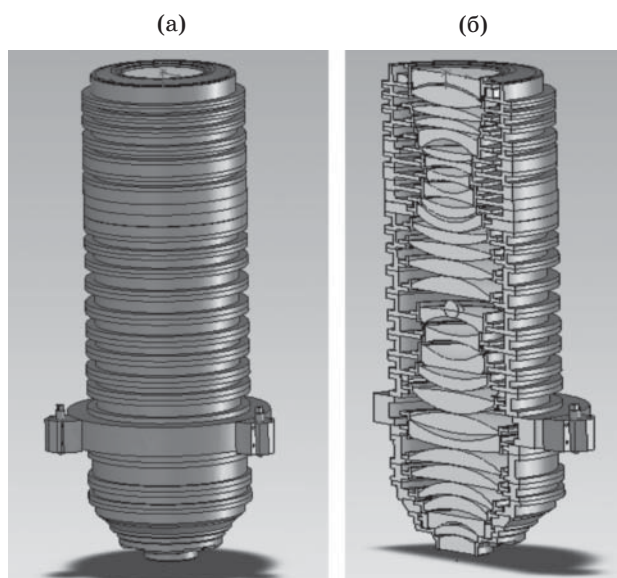


Рис. 5. Общий вид (а) и разрез (б) УФ фотолитографического объектива ФЕНИКС-248.

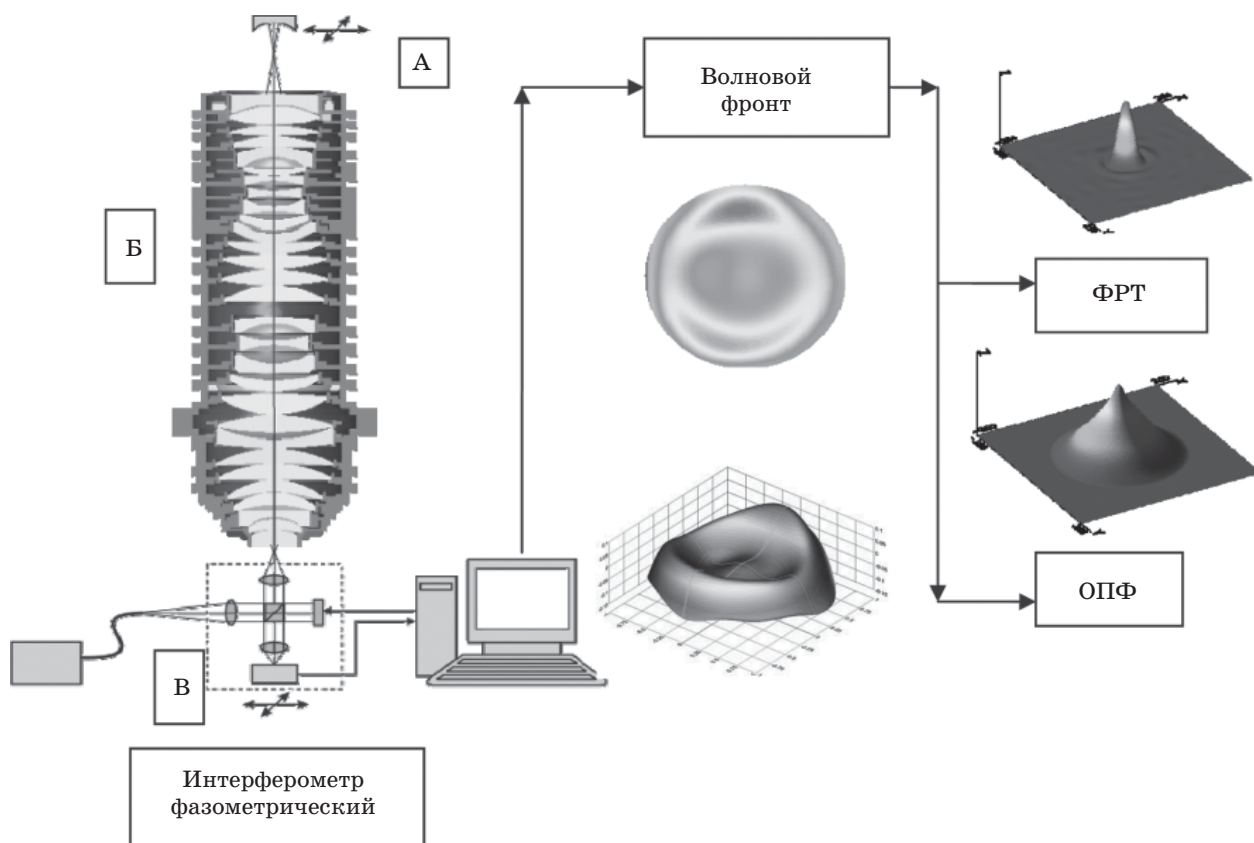


Рис. 6. Принципиальная схема стенда для финишной юстировки и автономных испытаний фотолитографического объектива. А – прецизионная система перемещения автоколлимационного контрзеркала, Б – прецизионная система перемещения интерферометра, В – испытуемый проекционный фотолитографический объектив.

⁷ CALS – continuous acquisition and life cycle support.

- Оптимизация объектива и корректировка ЭМ по результатам аттестации в процессе изготовления оптического материала по однородности, оптических поверхностей, фактических толщин и центрировки линз.

- Позиционирование и центрировка линз в корпусе с компьютерным контролем и управлением.

- Компенсационная доводка объектива в целом по результатам контроля волновых аберраций и дисторсии.

Фотолитографический объектив состоит из 29 линзовых модулей, каждый из которых содержит линзу, корпус линзы и внешний корпус модуля. Модули отличаются по назначению и имеют несколько отличную конструкцию. Большая часть линзовых модулей объектива имеют типовую конструкцию. Каждая из линз линзового модуля закреплена в отдельной оправе, установленной во внешний корпус модуля. Большинство оправ построены по кинематическому принципу и обеспечивают высокоточную финишную юстировку с помощью актюаторов, управляемых от компьютера. На линзы наносится просветляющее покрытие, разработанное в ГОИ им. С.И. Вавилова, которое обеспечивает коэффициент остаточного отражения менее 0,05%.

Для регулировки экспозиции предусмотрена управляемая компьютером ирисовая диафрагма. Объектив имеет систему компенсации изменения масштаба из-за изменений температуры и давления.

Финишная юстировка и автономные испытания фотолитографического объектива проводятся на стенде, принципиальная схема которого показана на рис. 6. Стенд включает неравноплечный лазерный фазометрический интерферометр, который работает на основной длине волны проекционного объектива. Стенд позволяет выполнять анализ деформаций волнового фронта, измерение масштаба и дисторсии изображения, формируемого проекционным объективом, определение

функции рассеяния точки (ФРТ), оптической передаточной функции (ОПФ) и моделирование тестовых изображений с учетом частично когерентного освещения и конечно-элементной модели фоторезиста [20]. Информация, полученная с помощью стенда, обеспечивает компенсационную сборку, а при необходимости – ретушь и доводку проекционного объектива.

Анализ перспектив развития проекционных объективов для нанолитографии

Анализ тенденций развития проекционных оптических систем для нанолитографии [6, 7] показывает, что новые поколения проекционных объективов для нанолитографии отличаются широким использованием асферических поверхностей.

Применение асферических поверхностей позволяет уменьшить габариты и материалоемкость объективов на 15–20%.

Рассматривается применение катодиоптрических систем (по идее Шупмана [28]), построенных по ломаной оптической схеме или in-line (см., например, патент США [29]). Катодиоптрические системы дают дополнительные возможности для коррекции хроматических аберраций и позволяют расширить спектральную полосу используемого излучения, но вследствие экранирования зрачка и рассеяния излучения на зеркалах возникают проблемы.

В качестве весьма перспективного направления рассматривается применение оптических материалов с более высоким, чем у кварца или флюорита, показателем преломления. Этот подход весьма важен для развития “супериммерсионных” систем, хотя разработки находятся в исследовательской стадии. Перечень работ, которые могут быть выполнены коллективом НИТИОМ по созданию оптических материалов с $n_{193} \geq 1,6$ для DUV фотолитографии приведен в табл. 1.

Таблица 1. Перечень работ, которые могут быть выполнены коллективом НИТИОМ по созданию материалов для “супериммерсионной” DUV фотолитографии

Выращивание и исследование кристаллов		Поиск технологии изготовления нанокерамики на основе оксидов металлов
кубические	ориентированные не кубические	
Лютециевый гранат $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ Твердые растворы $\text{BaF}_2\text{--LaF}_3$, $\text{BaF}_2\text{--LuF}_3$	Al_2O_3 с нулевой ориентацией Поиск новых кристаллов на основе многокомпонентных смесей фторидов	Нанокерамика MgO (0,85)– CaO (0,15) Нанокерамика $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$

Особенности фоточувствительных материалов для нанолитографии

Весьма важным компонентом фотолитографической нанотехнологии является фоточувствительный материал, пригодный для формирования наноструктур, а также разработка методов “преодоления” дифракционного предела, которая требует приспособления к конкретному оборудованию и техпроцессу. Последнее десятилетие ознаменовалось значительным прогрессом в области фоторезистов [30], начавшимся с создания нового типа органических резистов, способных работать с коротковолновым излучением. Это СА-резисты, в которых роль фоточувствительного стимулятора процесса формирования скрытого изображения с последующим его проявлением выполняют молекулы так называемого фотокислотного генератора (PAG)⁸. Активированная актиничным излучением молекула PAG вступает в реакцию с нерастворимыми радикалами матрицы фоторезиста, переводя их в растворимое состояние и повышая таким образом растворимость резиста в проявителе. Особенностью СА резистов является каталитический характер реакции: кислота регенерирует после каждой реакции, и от 500 до 1000 реакций могут стать результатом одного акта поглощения фотона. Все это приводит не только к повышению чувствительности, но и к высокой контрастности. Окончательное формирование скрытого изображения обычно происходит в процессе послеэкспозиционной термообработки в результате диффузии PAG. Как выяснилось, СА резисты пригодны и для более коротковолнового излучения, вплоть до EUV (13,5 нм). Однако применительно к изображениям высокого разрешения приходится отказаться от протяженной матрицы в пользу относительно низкомолекулярных соединений. Так, работая с основной в виде органических молекул длиной 2–5 нм, удалось достичь разрешения на уровне 22 нм, а в экспериментах с синхротронным излучением в отдельных опытах с интерференционной засветкой добиться разрешения 11 нм [31]. Вместе с тем понятно, что дальнейшее увеличение разрешающей способности потребует поиска принципиально иных решений. Как размер молекул матрицы, так и диффузионная природа формирования края рисунка не могут не стать ограничителями разрешающей способности СА резиста. Затруднения вызывает достижение приемлемой шероховатости границ рисунка (LER)⁹ при приемлемой чувствительности.

⁸ PAG – photo acid generator.

⁹ LER – line edge roughness.

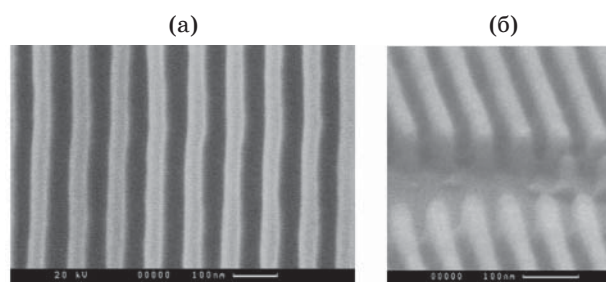


Рис. 7. Пленка As_2S_3 , проэкспонированная на синхротронном излучении с длиной волны 13,5 нм, после проявления демонстрирует отчетливую интерференционную структуру с полосами/зазорами 30–40 нм. а – вид сверху, б – вид под углом.

В ФТИ им. А.Ф. Иоффе имеется значительный задел в области разработки новых светочувствительных слоев для фотолитографии, использующих неорганические соединения. В настоящее время выполнены различные эксперименты по взаимодействию DUV и EUV излучения с тонкими неорганическими пленками. Исследованы пленки халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП), а также пленки гидрированных оксидов переходных металлов. Институт располагает необходимым научно-техническим потенциалом для разработки новых технических решений для фоточувствительных материалов с нелинейными свойствами в DUV и EUV диапазонах и технических средств их синтеза. Такие резисты могут оказаться пригодными для освоения диапазона $\text{CD} = 5\text{--}15$ нм. Один из примеров высокой разрешающей способности неорганического резиста, разработанного в ФТИ, приведен на рис. 7.

Рисунок задается маской, изготовленной электронно-лучевой литографией и не является предельным для используемой фоторегистрирующей среды.

Экспонирование проведено при интерференционной засветке на синхротронном излучении, и разрешение ограничено шагом применявшейся в эксперименте дифракционной решетки.

Заключение

Для достижения современных технических характеристик фотолитографической оптики, используемой при производстве современных УБИС в России, имеется возможность создания нанолитографических объективов на основе

Таблица 2. Программа работ в области нанолитографии

Диапазон	λ , нм	NA	CD, нм	Тип аппаратуры	Годы
DUV	193	0,9	60	Сканер	2010–2015
	193	1,3–1,5	45–32	Сканер иммерсионный	2011–2016
EUV	13,5	0,36–0,6	10–20	Сканер 2D	2010–2015
	13,5	0,27–0,35	20–25	Сканер	2010–2017

флюорита. Кроме того, в нашей стране создан фундаментальный задел в области проекционных нанофотолитографических систем для EUV области [22, 32, 33]. Поэтому представляется целесообразной программа работ в области нанолитографии [34], приведенная в табл. 2.

Период эффективного применения каждого поколения оптической литографии составляет не менее 10–15 лет, поэтому интенсификация работ в данном направлении позволит вывести отечественное производство УБИС на современный уровень и создать основу для его дальнейшего развития.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.intel.com/pressroom/kits/manufacturing/Fab32/index.htm>
2. *Chris Auth et. al.* Intel's 45nm CMOS Technology // Intel Technology Journal/. 2008. V. 12. № 2. <http://www.intel.com/technology/itj/2008/v12i2/3-managing/1-abstract.htm>
3. ASML drives the industry conversion to immersion. <http://www.asml.com/asml/show.do?ctx=13559&rid=27372>
4. *Vogler D.* Brion powers up to meet DPT challenges at 32 nm–22 nm // Solid State Technology. 2008. http://www.solid-state.com/display_article/320972/5/none/none/TETAK/Brion-powers-up-to-meet-DPT-challenges-at-32nm-22nm
5. <http://www.nikonprecision.com/>
6. *Bruning J.H.* Optical Lithography ...40 years and holding // Proc. SPIE. 2007. V. 6520. P. 652004.
7. *Ulrich W., Beiersdoerfer S., Mann H.J.* Trends in Optical Design of Projection Lens for UV and EUV Lithography // Proc. SPIE. 2000. V. 4146. P. 13–24.
8. *Das P.* Eximer Laser as a Total Light Source Solution for DUV Microlithography // Proc. SPIE. 2001. V. 4184. P. 323–329.
9. *Атежев В.В., Варпанетов С.К., Жуков А.Н., Курзанов М.А., Обидин А.З.* Эксимерный лазер с высокой когерентностью // Квант. электрон. 2003. Т. 33. № 8. С. 689–694.
10. *Ariga T., Mizoguchi H.* An Ultra-Line-Narrowed High-Power F₂ Laser for Dioptric Design Micro-lithography Exposure Tools // IEEE. 2004. V. 10. № 6. P. 1287–1292.
11. *Wong Alfred Kwok-Kit.* Resolution enhancement techniques in optical lithography // SPIE. 2005. V. TT47. 254 p.
12. *Levinson H.J.* Principles of lithography // SPIE. 2005. 423 p.
13. *Wolf S.* Silicon Processing for VLSI Era. Sanset Beach: Lattice Press, 2002. V. 4. 795 p.
14. ASML leads the market with immersion technology. <http://www.asml.com/asml/show.do?ctx=13559&rid=10668>
15. Nikon Announces ArF immersion Scanner for Double Patterning. http://www.nikon.com/about/news/2008/0220_01.htm
16. *Lerce M.* Lithography // Future FAB International. 2009. V. 28. P. 69–73.
17. *Wuest A., Hazelton A., Hughes G., Litt L., Goodwin F.* Cost Implications of EUV Lithography Technology Decisions // SEMANTECH. 2008. 31 p.
18. <http://www.nikonprecision.com/technology/roadmap.html>
19. ASML extends 248-nm for 80-nm chips, EETims, 2007. <http://www.eetimes.com/conf/sw/showArticle.jhtml?articleID=201001486&kc=2996>
20. *Gan M., Zhdanov D., Novoselskiy V., Fedorov A., Potyemin I., Ustinov S., Starkov A., Smirnov S.* “DEMOS III: new possibilities” // Proc. SPIE. 1995. V. 2540. P. 190–196.
21. *Ган М.А., Устинов С.И.* Компьютерное моделирование формирования наноизображений // Междунар. форум по нанотехнологиям 08. Тез. докладов. Т. 1. М., 2008. С. 47–48.
22. *Ган М.А., Бармичева Г.В., Старков А.А., Ган Я.М., Ларионов С.А.* Оптические системы для формирования наноизображений для DUV и EUV областей спектра // Междунар. форум по нанотехнологиям 08. Тез. докладов. Т. 1. М., 2008. С. 46–47.
23. *Burnett J.H., Levine Z.H., Shirley E.L.* Intrinsic birefringence in calcium fluoride and barium fluoride // Physical Review B. 2002. V. 64. P. 241102-R (1–4).
24. *Инденбом В.Л.* // Рост кристаллов. Т. VIII. М.: Наука, 1968. С. 303–309.

25. *Garibin E.A., Demidenko A.A., Mironov I.A., Petrovsky G.T., Reyterov V.M., Sinev A.N.* Process for growing of optical fluorite single crystals // Патент США. № 7001458. 2004.
26. *Garibin E.A., Demidenko A.A., Mironov I.A., Petrovsky G.T., Reyterov V.M., Sinev A.N.* Process for growing of optical fluorite single crystals // Патент США. № 6738893. 2004.
27. *Garibin E.A., Demidenko A.A., Mironov I.A., Petrovsky G.T., Reyterov V.M., Sinev A.N.* Multicompartment container for growing calcium fluoride monocrystals // Патент США. № 6673155. 2004.
28. *Слюсарев Г.Г.* Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 358 с.
29. *Shafer D.R., Beder S., Scuster K.H., Singer W.* // Патент США. № 7428105. 2008.
30. *Ma A., Park J.-O., Dean K., Wurm S., Naulleau P.* Benchmarking Commercial EUVL Resists at SEMATECH // Proc. SPIE. 2008. V. 6921. P. 692130.
31. *Auzelyte V., Dais C., Farquet P., Grutzmacher D., Heyderman L.J., Luo F., Olliges S., Padeste C., Sahoo P., Thomson T., Turchanin A., David C., Solak H.H.* Extreme ultraviolet interference lithography at the Paul Scherrer Institut // J. Microlith. Microfab. Microsyst. 2009. V. 8. P. 021204.
32. *Сейсян Р.* Нанолитография СБИС в экстремально дальнем вакуумном ультрафиолете (обзор) // ЖТФ. 2005. Т. 75. В. 5. С. 1–13.
33. *Салащенко Н.Н., Чхало Н.И.* Коротковолновая проекционная нанолитография // Вестник РАН. 2008. Т. 78. № 5. С. 450–457.
34. *Ган М.А., Сейсян Р.П.* Перспективы развития оптической нанолитографии // Междунар. форум по нанотехнологиям 08. Тез. докладов. Т. 1. М., 2008. С. 48–50.