

# Физическая аппаратура

УДК 681.7.03

## Оптические материалы в проекционных оптических системах фотолитографических установок ГУФ-диапазона: современное состояние и тенденции в разработке и применении

В. С. Анчуткин, А. Б. Бельский

ФНПЦ ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева", г. Красногорск, Московская обл., Россия

*Представлены результаты сравнительного анализа современного состояния и тенденций в разработке и применении оптических материалов — кварца и флюорита в проекционных оптических системах 193-нм литографических установок для производства сверхбольших интегральных микросхем (СБИС). Показано, что плавленый кварц и его модифицированные формы занимают доминирующую роль в качестве основного оптического материала и обладают большими потенциальными возможностями для создания современных и перспективных установок 193-нм иммерсионной литографии. Отмечена тенденция уменьшения процентного содержания флюорита в общем объеме оптических материалов проекционных объективов за счет использования новых технических решений и методов проектирования.*

PACS: 81.05.-t

### Введение

Немаловажным фактором создания наукоемких, высокотехнологичных оптико-электронных систем с гибкой конфигурацией является степень интеграции применяемой электронной элементной базы, определяемая уровнем технологии проектирования и изготовления СБИС.

Создание и совершенствование современной оборонной техники, изделий двойного назначения, приборов и оборудования для гражданских, медицинских и научных целей немислимы без постановки работ в целях совершенствования технологии производства СБИС.

В настоящее время фотолитография является базовой технологией производства СБИС в промышленных масштабах. Основным элементом технологической линии по производству СБИС, определяющим степень ее интеграции (технологическая норма или минимальный размер элемента), является установка проекционного экспонирования и мультипликации — степпер или сканер (в зависимости от конструктивного решения).

Проекционная оптическая система (ПОС) представляет собой одну из сложных систем установки, определяющей, по существу, ее основные технические характеристики и параметры. В ПОС входят источник излучения (экцимерный лазер на KrF), система передачи излучения (СПИ), система формирования режимов освещения (СФРО) и проекционный объектив (ПО).

В данной работе сделана попытка проанализировать вопросы применения оптических материалов для создания ПО, увязав их с тенденциями в методах и подходах к проектированию последних.

На сегодняшний день в мире известны три крупнейших производителя подобного оборудования — это холдинг ASML (Нидерланды) и корпорации Nikon и Canon (Япония), которые уже серийно выпускают образцы установок для уровня технологии 0,15—0,18 мкм, а с 2005 г. — установки для уровня технологии 0,1—0,13 мкм. Последние построены по типу сканеров, где экспозиция кадра осуществляется при синхронном перемещении щели, расположенной в плоскости фотошаблона и стола, на котором размещаются полупроводниковые пластины (ПП) диаметром 200 мм и более.

Анализ современного состояния и перспектив развития технологии производства СБИС с использованием фотолитографии глубокого ультрафиолетового (ГУФ) диапазона и определение на этой базе стратегии развития и оптимального облика ПОС включают рассмотрение комплекса вопросов, выходящих за рамки настоящей статьи и могут служить предметом отдельного исследования. Тем не менее нельзя не отметить того факта, что за рубежом в последние два—три года прорывное развитие получила технология производства СБИС, базирующаяся на использовании 193-нм иммерсионных фотолитографических систем и не требующих больших финансовых затрат

для своего внедрения в уже освоенную технологию на базе 193-нм "сухой" фотолитографии. В этих системах осуществляется заполнение жидкой средой пространства между последней поверхностью оптического элемента ПО и ПП и тем самым обеспечиваются условия прохождения лазерного пучка через среду с более высоким, чем у воздуха, показателем преломления. В "сухом" варианте литографии, где средой распространения света между ПО и ПП является воздух, предел значений числовой апертуры NA, определяющей при заданной длине волны и качестве ПО его разрешение, ограничен значениями, не превышающими 1, в то время как в варианте с иммерсией этот параметр определяется значением показателя преломления используемой жидкости. Ожидается, что это сможет обеспечить реализацию оптической литографии с технологической нормой 40 нм.

Высокая конкуренция на современном рынке выдвигает для разработчиков задачу создания фотолитографических установок, удовлетворяющих всевозрастающим требованиям потенциального потребителя при постоянном снижении показателя цена/качество. Эта тенденция формирует требования к технико-экономическим показателям как фотолитографической установки в целом, так и ПОС, являющейся одной из ее главных составных частей и, по существу, определяющей ее основные технические параметры.

Наиболее важной составной частью ПОС в техническом и финансовом аспектах ее разработки является ПО, оптимальный облик которого в значительной мере определяется правильным выбором оптических материалов и их соотношением.

В связи с этим особый интерес, с позиции оценки их потенциальных возможностей, представляют такие оптические материалы, как плавленный кварц  $\text{SiO}_2$  и флюорит  $\text{CaF}_2$ .

Традиционным оптическим материалом, широко используемым до настоящего времени в серийно выпускаемых известными зарубежными производителями ПО для фотолитографических установок на длинах волн, равных  $\lambda = 248$  и  $193$  нм, является, безусловно, плавленный кварц. Флюорит в незначительных количествах применяется, как правило, на длинах волн  $\lambda = 193$  нм в качестве дополнительного материала для снижения уровня хроматической aberrации [1], а также в силу его более высокой, чем у кварца, лучевой стойкости, для изготовления линз малых размеров, которые испытывают максимальную лучевую нагрузку в ПО.

Для тонкой линзы (рис. 1) анализ хроматической aberrации 1-го порядка, который достаточно эффективен для грубой оценки оптики, можно провести, используя формулу

$$\frac{1}{f} = (n_l - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right).$$

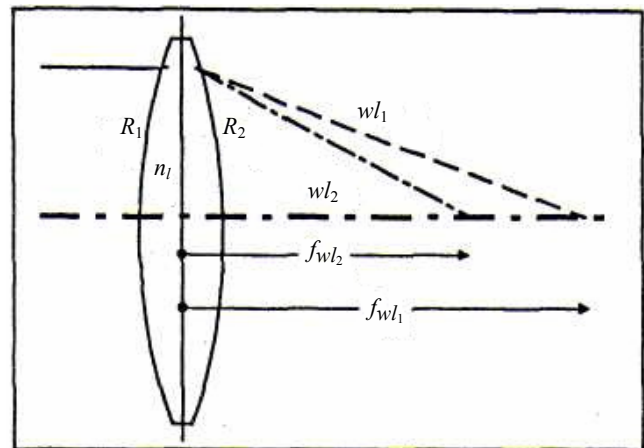


Рис. 1. Хроматическая aberrация тонкой линзы:

$R_1, R_2$  — радиусы кривизны;  $n_l$  — показатель преломления потенциалов;  $l$  — длина волны излучения;  $wl_1, wl_2$  — волновой фронт соответствующей длины волны;  $f_{wl_1}, f_{wl_2}$  — фокусное расстояние

Поскольку показатель преломления материала линзы  $n_l$  зависит от длины волны  $l$ , фокусное расстояние линзы  $f$  также будет изменяться с длиной волны.

В общем случае в ГУФ-диапазоне спектра  $n_l$  убывает с ростом длины волны, т. е.

$$n_{wl_2} > n_{wl_1},$$

когда

$$wl_1 > wl_2.$$

Таким образом, фокусное расстояние  $f$  возрастает с увеличением длины волны, т. е.

$$f_{wl_1} > f_{wl_2}.$$

Введем, по аналогии с классическим определением [2], относительную дисперсию

$$\varphi = \frac{n_{wl_2} - n_{wl_1}}{n_{wl_3} - 1},$$

которая, как легко заметить, изменяется в зависимости от используемого материала.

Для случая ахроматического линзового дублета имеем

$$\delta \left( \frac{1}{f} \right) = \frac{1}{f_{wl_1}} - \frac{1}{f_{wl_2}} = \frac{1}{f_1} \varphi_1 - \frac{1}{f_2} \varphi_2 = 0,$$

откуда следует

$$\varphi_1 < \varphi_2.$$

Для случая 193-нм литографии мы имеем флюорит для  $\varphi_1$  и плавленный кварц — для  $\varphi_2$ .

Согласно данным, представленным в работе [3], для каждого значения числовой апертуры (NA) ПО 193-нм литографической системы существуют ограничения на допустимый уровень aberr-

раций (рис. 2) и процентное содержание флюорита в оптическом материале (рис. 3).

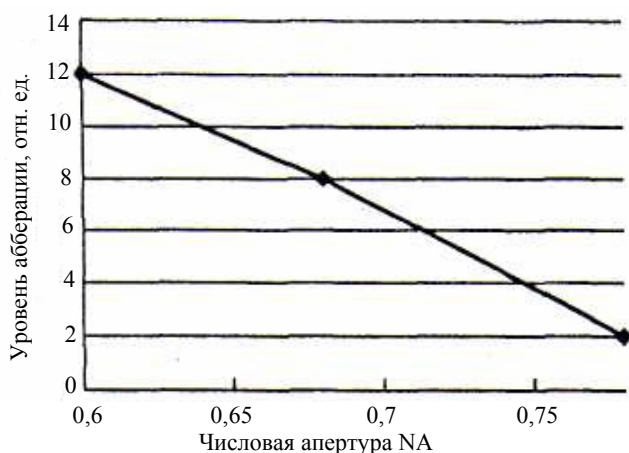


Рис. 2. Допустимое значение хроматической абберации в зависимости от значения числовой апертуры (NA) ПО

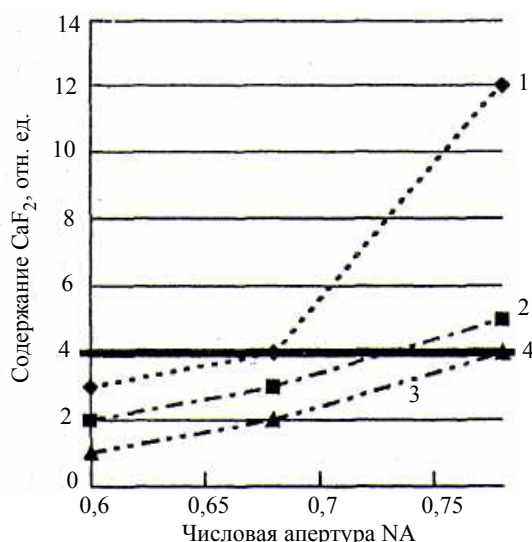


Рис. 3. Процентное содержание CaF<sub>2</sub> для различных значений числовой апертуры NA в зависимости от конструктивного решения оптической схемы ПО: 1 — стандартный тип ПО без асферики; 2 — стандартный тип ПО с асферикой; 3 — "сжатый" тип ПО с асферикой; 4 — допустимое количество CaF<sub>2</sub>

Если применить метод ахроматизации к традиционной (стандартной) конструкции ПО, то количество флюорита, необходимого для обеспечения требований к уровню абберации, превысит допустимую величину. Эффект ахроматизации может быть увеличен без изменения суммарной силы группы за счет увеличения силы положительной линзы из флюорита и абсолютного значения силы отрицательной линзы из плавленого кварца. Возникающие при этом абберации высоких порядков можно скорректировать за счет использования асферической оптики. При этом максимальное значение NA может достигать значения 0,73 без увеличения общего объема используемого флюорита (см. рис. 3).

Другой, более простой способ снижения хроматических аббераций без увеличения процентного содержания флюорита в ПО, так называемый способ "сокращения (количества элементов) системы" (system downsizing), основан на использовании прямо пропорциональной зависимости относительной дисперсии линзы от ее фокусного расстояния. Заметим, что этим способом осуществляется уменьшение и хроматической, и монохроматической аббераций. Однако при этом происходит пропорциональное уменьшение размера поля изображения, исправленного по абберациям, поскольку в этом случае в исходном размере поля изображения наблюдаются значительные по величине полевые абберации высокого порядка, такие как кома и дисторсия. Чтобы исправить эти абберации по всему исходному полю изображения, применяют асферическую оптику. Помимо этого, для сохранения заданного исходного размера поля изображения необходимо увеличить рабочий отрезок ПО (расстояние от внешней поверхности последней линзы ПО до поверхности ПП).

Концепция "сокращения системы" использовалась при проектировании ПО с NA = 0,78 для сканера модели S306C фирмы Nikon (Япония), в котором число линз удалось уменьшить примерно на 1/3 по сравнению с числом линз в ПО, установленных в сканерах моделей S302B и S305B.

Существенно важным является то обстоятельство, что в ПО с более высоким значением NA прослеживаются определенные тенденции к снижению процентного содержания флюорита по отношению к общему весу используемых в объективе оптических материалов, что связано с необходимостью снижения уровня локального рассеянного излучения (local flare).

Так, согласно [4], в сканерах моделей S306C, S307E и S308F, выпускаемых корпорацией Nikon, использованы ПО с NA, равными 0,78; 0,85 и 0,92, в которых процентное содержание CaF<sub>2</sub> (по весу) характеризуется значениями ~ 25, 6 и 2,5 %, соответственно (рис. 4). При этом уровень локального (диапазон 60 мкм) рассеянного излучения в ПО сканера модели S306C с 25%-ным содержанием CaF<sub>2</sub> примерно в два раза выше, чем в ПО сканера модели S307E с 6%-ным содержанием CaF<sub>2</sub> (рис. 5).

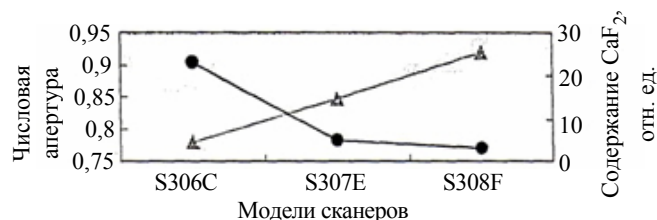


Рис. 4. Характеристики моделей сканеров фирмы Nikon: ▲ — NA объектива; ● — процентное содержание CaF<sub>2</sub>

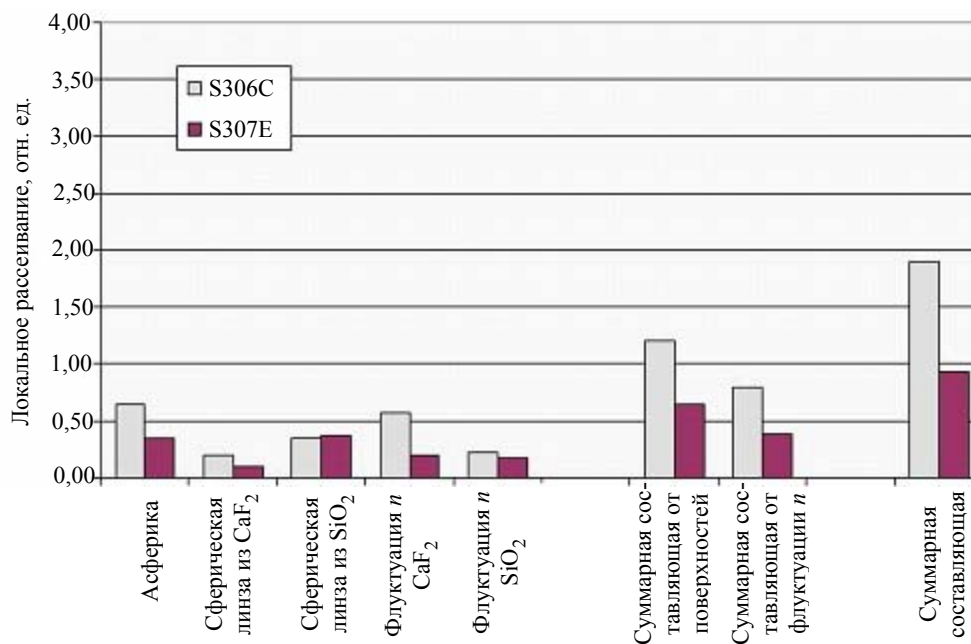


Рис. 5. Влияние различных факторов на уровень локального рассеяния излучения

Анализ современного состояния технологии получения монокристаллов CaF<sub>2</sub> больших (диаметр заготовок до 210 мм) и сверх больших (диаметр 300 мм и более) и перспектив его использования в качестве оптического материала для оптических систем фотолитографических установок с эксимерными лазерами на KrF ( $\lambda = 248$  нм), ArF ( $\lambda = 193$  нм) и F<sub>2</sub> ( $\lambda = 157$  нм) показаны в работах [5—8].

• На протяжении последних лет за рубежом прилагают большие усилия в части выращивания монокристаллов CaF<sub>2</sub> в целях реализации технологии производства СБИС на базе 157-нм литографии с использованием эксимерных лазеров на F<sub>2</sub>.

Имеющиеся технологические трудности на пути создания заготовок флюорита необходимых размеров, удовлетворяющих требованиям по таким основным параметрам, как двулучепреломление (внутреннее и обусловленное механическим напряжением (stress and intrinsic birefringes)) и однородность показателя преломления требуют для своего решения больших объемов финансирования. В частности, в работе [6] подчеркиваются значительная зависимость лучевой стойкости CaF<sub>2</sub> от числа включений (примесей), а также проблема стабильности его поставок.

Эти усилия однако до сих пор не дали удовлетворительных результатов, что привело Intel (Санта Клара, США; Santa Clara, CA), IBM и других известных производителей микропроцессоров к решению отложить разработку 157-нм литографии с эксимерными лазерами на фторе F<sub>2</sub> и сосредоточиться на проведении работ по дальнейшему развитию 193-нм литографии с технологией улучшенного разрешения (RET) и 193-нм иммерсион-

ной литографии. В частности, по этой причине один из крупнейших производителей эксимерных лазеров Lambda Physik AG заявила о прекращении работ по созданию 157-нм F<sub>2</sub> источников, в разработках которых она занимала лидирующие позиции.

• Наблюдаемая за рубежом тенденция возрастания объемов производства флюорита реализуется за счет заготовок среднего и малого диаметров. Эта тенденция вызвана переходом (на базе вышеуказанной 193-нм литографии) к серийному производству полупроводниковых компонент с технологическими нормами 0,13 мкм и ниже, вплоть до 45 нм, для реализации которых необходимы сканеры с высокоапертурными ПО.

Флюорит в больших объемах используется также в оптических системах (формирования режимов) освещения современных литографических установок, что обусловлено его большой лучевой стойкостью.

Как уже отмечалось выше, применение флюорита в ПО 193-нм литографических установок диктуется в основном необходимостью снижения хроматических aberrаций ПО, которые при столь высоких уровнях разрешения ПО (больших значениях NA) начинают оказывать существенное влияние на качество формируемого в фоторезисте изображения топологической структуры.

Решение этой проблемы возможно также за счет сужения спектральной полосы источника излучения — эксимерного лазера. Величина указанного параметра лазера является одной из основных среди факторов, определяющих его стоимость. Таким образом, выбор оптимального по критерию цена/качество проектного решения (облика) ПО



определяется решением системной задачи оптимизации ПОС в целом. Все это привело к тому, что следующим существенным шагом в дальнейшем развитии методов проектирования высокоапертурных ПО современных сканеров, предназначенных для иммерсионной литографии, явился переход от линзовой к зеркально-линзовой схеме. Так, в последних моделях сканеров трех упоминавшихся ранее крупнейших мировых производителей подобного оборудования ПО построены по зеркально-линзовой схеме, которая в общем случае имеет вид, представленный на рис. 6.

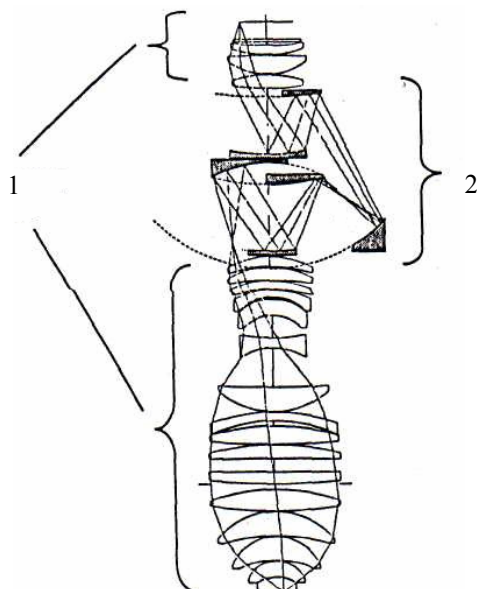


Рис. 6. Общий вид зеркально-линзового ПО:

1 — линзовые компоненты ГУФ-оптики;  
2 — зеркальные компоненты оптики вакуумного УФ

Переход к этой схеме, особенно в случае иммерсионной литографии, где к источникам излучения предъявляются повышенные требования как к мощности, так и к ширине спектра излучения, позволил успешно решить задачу, не прибегая к дополнительным объемам флюорита, необходимым в случае применения линзовой схемы.

Наряду с работами по флюориту, за рубежом также интенсивно ведутся исследования и разработки в области создания различных модифицированных форм кварца, обладающих улучшенными оптическими характеристиками и параметрами. Это привело к тому, что следующим существенным шагом в дальнейшем развитии современных сканеров, предназначенных для иммерсионной литографии, явился переход от линзовых (dioptric lens) к зеркально-линзовым ПО (catadioptric lens) [4] (см. рис. 6). Так в 193-нм иммерсионных моделях сканеров, упоминавшихся ранее крупнейшими мировыми производителями подобного оборудования, ПО построены по зеркально-линзовой схеме с  $NA = 1,2$  (ASML) и  $NA = 1,3$  (Canon, Nikon),

причем, как отмечается в [9], этот переход становится необходимым в случае, когда числовая апертура ПО превышает значение  $NA \approx 1,1$ .

Переход к зеркально-линзовой схеме ПО в сканерах для 193-нм иммерсионной литографии, где к источникам излучения предъявляются повышенные требования, как к мощности, так и к ширине спектра излучения, позволил решить задачу, не прибегая к дополнительным объемам флюорита, необходимым в случае применения линзовой схемы. Однако и в этом случае, особенно при использовании для освещения поляризованного излучения, применение  $CaF_2$  оказывается нежелательным в силу эффекта двулучепреломления, индуцированного пространственной дисперсией материала (birefringence induced by spatial dispersion (BISD)), называемого иногда также внутренним двулучепреломлением (intrinsic birefringence). Этот эффект приводит к фазовому запаздыванию волнового фронта, формирующего "воздушное" изображение в слое фоторезиста [10], что влечет за собой потерю контраста и, как следствие, к деградации качества изображения.

Учитывая вышеотмеченные проблемы применения флюорита, связанные с его оптическими и механическими свойствами, а также стоимостными показателями и процент выхода годных заготовок необходимого размера, можно констатировать, что плавленый кварц на сегодняшний день, занимает лидирующие позиции в качестве основного оптического материала для оптических систем 193-нм литографии.

За рубежом интенсивно ведутся исследования и разработки в области создания различных модифицированных форм кварца, обладающих улучшенными оптическими характеристиками и параметрами.

Так, в 2005 г. американские корпорации Newport (Irvine, CA) и Massachusetts Institut of Technology (MIT; Cambridge, MA) приступили к осуществлению совместного проекта по созданию ПО для 193-нм иммерсионной литографии с числовой апертурой  $NA = 1,3$  и разрешением не хуже 50 нм.

В качестве основного оптического материала для ПО заявлено фторированное кварцевое стекло (fluorinated fused-silica), которое, как показали исследования, устраняет ряд проблем, связанных с двулучепреломлением, возникающих в случае использования для этих целей флюорита.

Разрабатываются технологии, позволяющие получать кварцевое стекло, легированное фтором (fluorine doped silica glass), называемое также модифицированным кварцем "modified fused silica" с оптическим пропусканием в области ГУФ, значительно превосходящим этот показатель для немодифицированного кварцевого стекла.

Проводятся также работы по созданию модифицированного кварца с пропусканием в области вакуумного ультрафиолета (УФ) в целях замены  $\text{CaF}_2$  в фотолитографических системах на длине волны 157 нм. Однако, согласно [11] (рис. 7), полученные образцы модифицированного кварца обладают недостаточным значением коэффициента пропускания на длине волны  $\lambda = 157$  нм, чтобы составить реальную конкуренцию  $\text{CaF}_2$ .

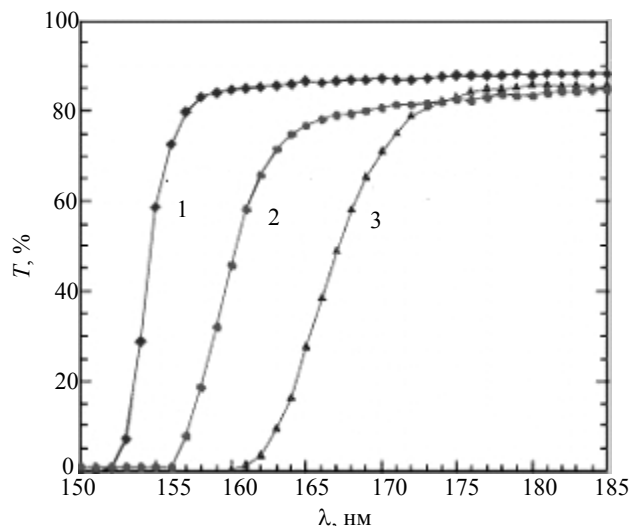


Рис. 7. Спектр пропускания трех типов кварцевого стекла в области вакуумного УФ вблизи длины волны  $\lambda = 157$  нм:

1 — модифицированная форма кварца; 2 — кварц с низким содержанием OH; 3 — кварц HPFS фирмы Corning

Для сравнения на рис. 8 представлен спектр пропускания плавленого кварца толщиной 2 мм и кварца толщиной 6 мм, легированного фтором (modified Fused Silica) [1].

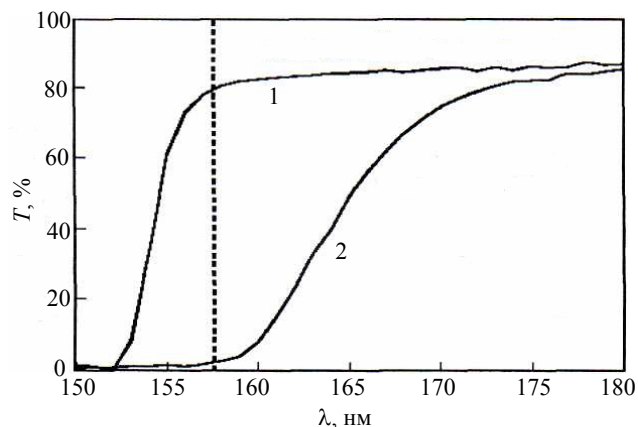


Рис. 8. Спектры пропускания плавленого кварца и модифицированного плавленого кварца:

1 — модифицированный плавленый кварц (6 мм);  
2 — плавленый кварц (2 мм)

Исследованию оптических свойств модифицированного кварца достаточно посвящено много работ [12—16].

В настоящее время есть все основания полагать, что рядом таких известных производителей

оптического кварца как SCHOTT Lithotec AG (Германия), Heraeus Quarzglas GmbH&Co. KG (Германия), Corning (США) и Dynasil (США) уже начата подготовка к серийному производству подобного рода кварцевого стекла.

На ежегодной международной выставке SEMICON Europa 2005, прошедшей в апреле в г. Мюнхене (Германия), корпорация ASAHII GLASS Co., LTD (Токио, Японии) заявила о выходе на рынок с новыми сериями (QD) кварцевого стекла, специально предназначенными для использования в 193-нм литографических системах с использованием в качестве источников излучения эксимерных лазеров на ArF. В рекламном проспекте приводятся данные о величине начального оптического пропускания ( $\geq 99,75\%$  на  $\lambda = 193$  нм) и пренебрежимо малых потерях начального оптического пропускания после длительного воздействия ArF лазерного излучения. Для фотолитографии с использованием в качестве источников излучения лазеров на  $\text{F}_2$  ( $\lambda = 157$  нм) эта фирма предложила модифицированное кварцевое стекло серии QF с оптическим пропусканием на  $\lambda = 157$  нм, превышающим 85 % (при толщине образца 6,35 мм). При этом проведенные SEMATECH совместно с MIT Lincoln Laboratory (Cambridge, MA, USA) экспериментальные исследования показали высокую лучевую стойкость этого стекла. В частности, в экспериментах при воздействии на образцы стекла излучением  $\text{F}_2$ -лазера ( $\lambda = 157$  нм) с энергетической плотностью потока в импульсе, равной  $0,3$  мДж/см<sup>2</sup>, и количестве воздействующих импульсов порядка 90 млн, каких-либо изменений в оптическом пропускании образцов зафиксировано не было. (Оптические характеристики и параметры этих материалов представлены в каталоге фирмы).

Лучевая стойкость оптического материала определяет время жизни ПОС, которое является одной из важнейших технико-экономических характеристик литографической установки в целом. Принято считать, что время жизни должно быть порядка 10 лет, что составляет, по разным источникам [17, 18], от 100 до 400 млрд лазерных импульсов.

Как уже отмечалось выше, плавленый кварц и его модификации являются основным материалом для оптических систем (ОС) литографии на длинах волн 248 и 193 нм. По этой причине исследованию его основных оптических свойств и влиянию на них различных воздействующих факторов посвящено множество работ. К числу первых работ в этом направлении можно отнести [19], где рассмотрено влияние излучения KrF и ArF эксимерных лазеров на пропускание, показатель преломления и плотность плавленого кварца.

В последовавшей за ней серии работ [17—22] исследованы эффекты уплотнения (compaction) и разрежения (rarefaction) в кварце, представлены модели и механизмы возникновения этого явления и их влияние на основные характеристики материала, определяющие время жизни ОС.

Важность этих исследований обусловлена тем, что для дальнейшего развития и совершенствования 193-нм иммерсионной литографии потребуются источники излучения с выходной мощностью от 40 до 60 Вт и, возможно, до 90 Вт (для сравнения в "сухом" варианте 193-нм литографии обычно используются источники излучения с мощностью от 10 до 20 Вт). При таких значениях мощностей указанные выше эффекты могут оказывать заметное влияние на оптические свойства кварца, приводящие к снижению времени жизни ОС. В связи с этим определен интерес с точки зрения увеличения времени жизни ОС перспективных 193-нм иммерсионных сканеров представляет новый подход к их проектированию [23], заключающийся в моделировании влияния излучения (экспозиции) на механизм изменения показателя преломления кварца.

Используемая для этих целей фирмой Sumet (США) последняя модель имеет вид [23]

$$\int \delta n = \Delta n_{sat} \left( 1 - e^{-\frac{NI}{D_0}} \right) + \left( k_2 \frac{NI^2}{t_{is}} \right)^b, \quad (1)$$

где  $\delta n$  — изменение показателя преломления;  
 $N, I, t_{is}$  — число импульсов, их интенсивность и длительность, соответственно;  
 $b, k_2, D_0$  и  $\Delta n_{sat}$  — коэффициенты, зависящие от рецептуры (состава) кварца.

Первое слагаемое в формуле (1) описывает эффект разрежения, второе — эффект уплотнения. Согласно модели эффект уплотнения обусловлен движением молекул, получивших энергию в результате двухфотонного процесса. Скорость появления эффекта уплотнения является функцией мгновенной энергии  $[NI^2/t_{is}]$  излучения и свойств компонентов специфической рецептуры плавленого кварца (коэффициент  $k_2$  и показатель экспоненты  $b$ ). Следовательно, увеличение длительности импульса при том же значении его энергии приводит к снижению скорости появления эффекта уплотнения.

Эффект разрежения — это уменьшение оптической плотности, которое, как принято считать, вызвано расширением материала, обусловленным наличием SiOH. Водород привносится в состав плавленого кварца в технологическом процессе его производства, и его количество до некоторой степени может контролироваться производителем. Согласно модели этот эффект обусловлен однофо-

тонным процессом и является, таким образом, функцией суммарной интегральной плотности потока излучения (NI) и свойств компонентов специфической рецептуры плавленого кварца (коэффициенты —  $\Delta n_{sat}$  и  $D_0$ ).

Длительность импульса излучения, как следует из формулы (1), не оказывает влияния на этот эффект. Если предположить, что предложенная модель верна, т. е. отражает происходящее в действительности, влияние наличия водорода и его концентрации, то реакция разрежения должна с некоторой постоянно убывающей скоростью (описывается показателем экспоненты) достигнуть уровня насыщения ( $\Delta n_{sat}$ ).

Как показано в работе [23], при высоких уровнях выходных мощностей источников излучения, предполагаемых к использованию в перспективных сканерах, в зависимости от состава (рецептуры) плавленого кварца может доминировать тот или иной эффект.

Получив значения соответствующих коэффициентов для ряда образцов плавленого кварца с различными рецептурами и оценив лучевую нагрузку каждого элемента оптической системы, пользуясь моделью (формула (1)), можно оптимизировать время жизни ОС. Следует заметить, что вопрос оценки лучевой нагрузки является достаточно сложным, поскольку для каждого элемента эта величина меняется в зависимости от вида фотошаблона, определяемого логикой соответствующего слоя СБИС, а также типа используемого освещения. В ОС литографической установки линзы большого размера обычно испытывают меньшую лучевую нагрузку (в расчете на единицу площади), чем линзы малого размера. На практике оптимизация заключается в выборе, с учетом лучевой нагрузки, кварца определенной рецептуры для каждой линзы в целях балансировки эффектов разрежения и уплотнения. В результате этого достигается минимизация изменений показателя преломления в течение времени жизни линзы. Длительность импульса излучения определяется конструктивными особенностями используемого лазера и должна быть выбрана в качестве основного параметра в этой достаточно сложной задаче оптимизации.

Выше приведены результаты анализа современного состояния и перспектив создания и использования плавленого кварца и его модификаций, а также флюорита в ОС 193-нм литографических установках за рубежом.

ФНПЦ ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева" в рамках Российско-Белорусской программы "Победа-2", направленной на создание кластерного оборудования для производства СБИС, был определен в качестве головного предприятия от Рос-

сии по разработке проекционной оптической системы (ПОС) фотолитографической установки (степпера) для производства СБИС с технологической нормой 0,25 мкм.

Основными соисполнителями ФНПЦ ОАО "КМЗ" являлись Центр физического приборостроения Института общей физики Российской академии наук (ЦФП ИОФ РАН) — в части работ по источнику излучения и СПИ и ФГУП «НПК "Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова"» — в части работ по СФРО и ПО.

В число соисполнителей входили также: ФГУП «НИТИОМ ВНЦ "ГОИ им. С. И. Вавилова"» — в части оптического материала (флюорита кальция), ЗАО "Ривас" (Россия, С.-Петербург) — в части системы виброгашения и горизонтирования технологического комплекса для сборки, юстировки и испытанной СФРО и ПО и ПОС, а также ОАО "Ангстрем" (Россия, Москва, Зеленоград) — в части тестовых объектов, программ и методик испытаний.

В России работы по созданию этих оптических материалов находятся на недопустимо низком уровне по сравнению с зарубежным.

Наиболее продвинутыми в области создания так называемого синтетического "сухого кварца" являются работы Института химии силикатов (С.-Петербург) и Института химически чистых реактивов (Москва), которые разработали собственную технологию его получения из жидкой фазы. Этими организациями совместно с Миасским машиностроительным заводом (ММЗ, г. Миасс Челябинской обл.) решаются задачи повышения качества этого материала и доведения его до уровня, отвечающего требованиям фотолитографии. В частности, образец "сухого кварца" (заготовка размером  $\varnothing 250 \times 36$  мм), полученный в ММЗ из отечественного сырья и исследованный в ФНПЦ ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева", отвечает необходимым требованиям по однородности показателя преломления (на диаметр 130 мм значение этого параметра не превышает  $1 \cdot 10^{-6}$ ), но не обладает требуемой устойчивостью к ГУФ-облучению, при этом наблюдается также заметная люминесценция. (Спецификация на этот оптический материал представлена в каталоге продукции ММЗ).

Необходимо дальнейшее продолжение работ по очистке сырья и технологии производства. К сожалению, целевое финансирование данных работ в России отсутствует, а проводить в полном объеме дорогостоящие эксперименты из собственных средств производственное предприятие ОАО "ММЗ" не в состоянии.

В июне 2005 г. ФНПЦ ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева" представлены предложе-

ния по созданию оптико-электронных комплексов и систем наблюдения в УФ-области спектра на базе "сухого кварца".

## Заключение

В настоящее время формируются предложения в новую программу Союзного государства, в рамках которой планируется не только завершение работ по созданию опытного образца степпера с разрешением 0,18—0,25 мкм (на длине волны  $\lambda = 248$  нм), но и начало с 2009 г. комплекса работ по созданию степ-сканера с разрешением до 0,065 мкм (на длине волны  $\lambda = 193$  нм).

В процессе выполнения НИР в рамках программы Союзного государства "Победа-2" в период с 2003 по 2005 г. ФГУП "НИТИОМ" проведен комплекс работ по отработке технологии получения отечественного крупногабаритного флюорита с использованием зарубежного сырья. В результате выполнения работ были получены положительные результаты, касающиеся качества материала. Однако чрезвычайно низкий выход годных заготовок (не более 15 %) ставит под сомнение возможность внедрения этой технологии к производству флюорита в промышленных масштабах. При оценке перспектив создания в России крупногабаритного флюорита литографического качества следует учесть малый по сравнению с кварцем объем существующего и потенциального рынков, сравнительно высокую стоимость и отсутствие отечественного сырья для его производства. Все это играет не в пользу флюорита и не может служить положительным аспектом в решении вопросов целесообразности дальнейших работ без оптимизации фактора цена/качество в выходе заготовок флюорита.

Следует отметить, что в приводимой работе не рассмотрен вопрос, касающийся оптических материалов с высоким показателем преломления, используемых для создания последней линзы ПО в 193-нм иммерсионных сканерах, поскольку это предмет отдельного исследования, в котором его логично было бы увязать с проблемами создания иммерсионных жидкостей и фоторезистов, и это будет темой новых исследований и публикаций.

## Литература

1. Trybula W. J. Status of 157-nm optical lithography// *Microolith., Microfab., Microsyst.* 2005. Jan-Mar. V. 4(1). P. 011007-1—011007-5.
2. Ландсберг Г. С.// *Оптика*. — М.: Наука, 1976. С. 314.
3. Matsuyama T. et al. High NA and low residual aberration projection lens for DUV scanner: *Proc.//SPIE.* 2002. V. 4691. P. 687—695.



4. Matsuyama T. et al. Nikon Projection Lens Update: Proc.//Ibid. 2004. V. 5377. P. 730—741.
5. Hahn J. et al. Critical enabling properties of CaF<sub>2</sub> lens blanks for state of the art lithography tools: Proc.//Ibid. 2003. V. 5040. P. 734—741.
6. Yanagi H. et al. Properties of large CaF<sub>2</sub> crystals grown by CZ method for lens materials: Proc.//Ibid. 2004. V. 5377. P. 1886—1893.
7. Peski C. V. The current State of Calcium Fluoride: An Overview. <http://www.future-fab.com/>
8. Maushake P. Calcium fluoride offers unique optical properties//OLE. June 2008. P. 35—38. <http://www.optics.org/ole>
9. Hand A. Lithography Toolmakers Agree on Dual-Stage Immersion//Semiconductor International. August 2005. P. 30.
10. Serebriakov A. et al. Correction of the phase retardation caused by intrinsic birefringence in deep UV lithography: Proc.//SPIE. 2005. V. 5754. P. 1780—1791.
11. Smith B. W. Modified silica transmits UV//Laser Focus World. 2001. V. 37. Issue 7.
12. Koichi A. Fluorine doped silica glass: What kind of applications can we expect?//Optronics (Japan). 2000. V. 217. P. 190—193.
13. Glebov L. Fluorinated silicate glass for conventional and holographic optical elements: Proc.//SPIE. 2007. V. 6545. P. 507—654.
14. Hiroshi K. et al. Refractive index and density in F- and Cl-doped silica glasses//Applied Physics Letters. 2005. V. 86. Issue 16. id. 161907 (3 pages).
15. Koike A., Sugimoto N. Temperature dependences of optical path length in fluorine-doped silica glass and bismuthate glass: Proc.//SPIE. 2006. V. 6116. P. 61160Y.
16. Trukhin N., Jansons J., Ermolenko T. A., Cheremisin I. I. Luminescence of fluorine doped silica glass//Journal of Non-Crystalline Solids. 2003. V. 332. P. 219—228.
17. Moll J., Dewa P. Laser resistance of fused silica for microlithography: Experiments and models: Proc.//SPIE. 2002. V. 4691. P. 1734—1741.
18. Natura U. et al. Excimer laser induced defect generation in Lithosil: Proc.//Ibid. 2004. V. 5377. P. 1708—1714.
19. Schenker R. et al. Durability of Experimental Fused Silica to 193-nm-Induced Compaction: Proc.//SPIE. 1997. V. 3051. P. 44—53.
20. Rothschild D. J. et al. Effects of eximer laser irradiation on the transmission, index of refraction, and density of ultraviolet grade fused silica//Appl. Phys. Lett. 1898. Sep. 25. V. 55 (13). P. 1276—1278.
21. Allan D. C. et al. Induced density changes in 193-nm excimer-laser-damaged silica glass: a kinetic model: Proc.//SPIE. 2004. V. 5377. P. 827—835.
22. Aglots J. M. et al. Verification of compaction and rarefaction models for fused silica with 40 billion pulses of 193-nm excimer laser exposure and their effects on projection lens imaging performance: Proc.//SPIE. 2004. V. 5377. P. 1815—1827.
23. Aglots J. M. Compaction and rarefaction affect photolithography system lifetime//Laser Focus World. 2005. V. 41. Issue 11. P. 103—107.

Статья поступила в редакцию 16 июля 2008 г.

## Optical materials in DUV lithographic projection exposure systems: the current status and tendency of development and application

V. S. Anchutkin, A. B. Belsky

"Krasnogorsky Zavod After S. A. Zvereva" JSC, Krasnogorsk, Moscow reg., Russia

*The results of comparative analysis of the current state and tendency of development and application of CaF<sub>2</sub> and fused silica in DUV lithographic projection exposure systems for ICs production are presented. Fused silica and its modified forms are shown to have dominated as a key optical materials and have great potentials for the purpose of creating up-to-date and perspective models of 193-nm immersion lithography systems. The tendency of CaF<sub>2</sub> percentage reduction in total volume of optical materials in projection lens is noted. It is achieved by using new engineering solutions and designing methods.*

PACS: 81.05.-t

\* \* \*