

Заключение

Размерные оценки – один из мощных методов получения информации о связи величин, при этом метод не требует использования сложных математических вычислений. Данный метод обсуждается уже давно, и на эту тему существует обширная литература. Начать ознакомление мы рекомендуем с книги [4]. Она также прекрасно подойдёт для студентов технических специальностей.

Литература

1. Засов А.В., Постнов К.А. Общая астрофизика. – Фрязино, 2006. с. 204.
2. Физическая энциклопедия. Т.5. М.: «Большая российская энциклопедия» 1998. – с. 427.
3. Физика космоса. М.: Советская энциклопедия. 1986. - с. 527-532.
4. Сена Л.А. Единицы физических величин и их размерности. М.: Наука 1988. с. 98.

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИММЕРСИОННОЙ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ЛИТОГРАФИИ

Канд. техн. наук *Н.Н.Балан*, канд. техн. наук *В.А.Васин*, доктор техн. наук *Е.Н.Ивашов*,
П.С.Костомаров, канд. техн. наук *С.В.Степанчиков*
 (Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ)

Современная планарная технология представляет собой совокупность технологических операций, используемых при изготовлении полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Ключевым процессом планарной технологии является литографический процесс, заключающийся в формировании рельефа в диэлектрических и металлических плёнках на поверхности полупроводниковых пластин, в том числе, для селективного удаления плёнки двуокиси кремния при создании диффузионных структур.

Требования к быстродействию вычислительных мощностей и к повышению степени интеграции заставляют совершенствовать планарную технологию и методы литографии, использовать новые источники излучения, уменьшая при этом длину волны, применять новые резисты, материалы и конструкционные параметры основных узлов литографических установок. Сохраняющиеся тенденции последних 20-и лет к уменьшению размеров элементов сверхбольших интегральных схем (СБИС), требуют решения задач повышения разрешения, ужесточения допусков на размеры, а также точности совмещения топологических слоев и воспроизводимости полученных результатов.

К методам повышения разрешающей способности процесса литографии от-

носят: использование внеосевого освещения и источников сложной формы; применение фазосдвигающих промежуточных шаблонов и фазовых фильтров; иммерсионную литографию; методы двойной литографии/травления; метод коррекции оптического эффекта близости. Внедрение вышеперечисленных методов, кроме последнего, возможно только при наличии дорогостоящего технологического оборудования и специалистов (технологов, конструкторов, наладчиков) высокого уровня, имеющих опыт работы с самыми передовыми технологиями.

Иммерсионная литография (*Immersion lithography*) – способ повышения разрешающей способности за счет заполнения воздушного промежутка между последней линзой и пленкой фоторезиста жидкостью с показателем преломления $n > 1$ (метод иммерсии) [1]. Угловое разрешение увеличивается пропорционально показателю преломления. Современные литографические установки используют в качестве жидкости высокоочищенную воду, позволяя работать с техпроцессом менее 45 нм [2] (Системы с использованием иммерсионной литографии выпускаются фирмами ASML, Nikon и Canon). Улучшением данной технологии можно считать методику HydroLith, в которой измерения и позиционирование производится на су-

хой пластине, а экспонирование – на «мокрой».

В рассматриваемой литографии свет проходит сверху вниз через систему линз, затем попадает в воду (или другую иммерсионную жидкость), находящуюся между нижней линзой и резистом на поверхности пластины (рис. 1).

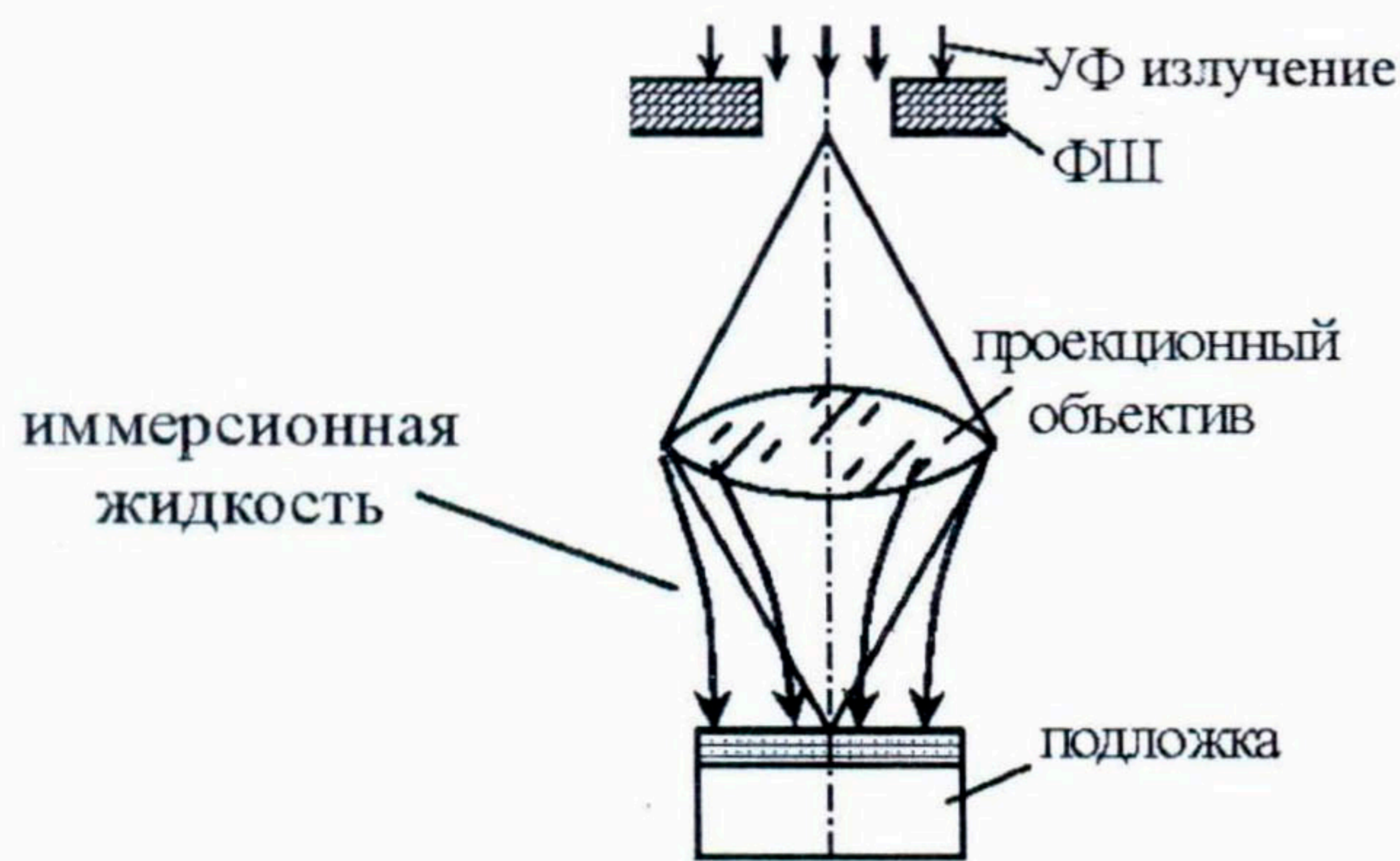


Рис. 1. Принципиальная схема метода иммерсионной литографии

Принцип иммерсионной литографии состоит во введении жидкости (воды или другой жидкости с высоким показателем преломления) между проекционным оптическим объективом и пластиной для достижения большей глубины фокуса (при числовой апертуре объектива ниже 1,0) или для получения проекционной системы с эффективной числовой апертурой более 1,0, что в конечном результате улучшает разрешающую способность процесса.

Очевидно, что ключевая проблема иммерсионной литографии состоит в устранении дефектов, вызываемых несовместимостью фоторезиста и воды. Как прогнозировали, если проблема дефектов будет устранена, то 193 нм иммерсионная литография станет основной для формирования рисунков с критическими размерами 45 нм и 32 нм. Эти прогнозы подтвердились.

Продолжаются исследования по поиску новых иммерсионных жидкостей с более высоким показателем преломления, позволяющих повысить разрешающую способность литографии для проектных норм выше 32 нм [1], чему способствует IDEF0 функциональное моделирование иммерсионного литографического процесса.

IDEF методология моделирования, основанная на графическом представлении производственных систем, используется для создания функциональной модели, являющейся структурированным изображением функций производственной системы или среды, а также информации и объектов, связывающих эти функции.

Назначение функциональной модели, определяемой как «архитектура», заключается в том, что она графически представляет основные взаимоотношения в среде моделируемой системы – функциональные связи, идентификацию информационных потоков, а так же динамическое взаимодействие ресурсов. IDEF-модель становится «архитектурой», когда используется для более глубокого понимания и анализа не только производственной системы или её окружения, но и взаимодействия её компонентов (подсистемы, организации и технологии) друг с другом.

Рассмотрим IDEF0 функциональную модель применительно к процессу формирования топологии объектов методом ультрафиолетовой иммерсионной литографии (рис. 2).

Метод иммерсии в литографии позволяет повысить разрешающую способность путем увеличения числовой апертуры за счет изменения угла полного отражения на границе раздела сред объектив - воздушный зазор (между объективом и пластиной). Для использования иммерсионного литографического процесса необходимо применение методов повышения разрешающей способности процесса проекционной литографии, таких как:

- использование внеосевого освещения при экспонировании резиста;
- разработка и применение фазосдвигающих шаблонов (PSM);
- применение методов коррекции оптического эффекта близости [3];
- разработка стратегии технического обслуживания оборудования иммерсионной ультрафиолетовой литографии (ИУФЛ);
- метрологическое обеспечение иммерсионного литографического процесса.

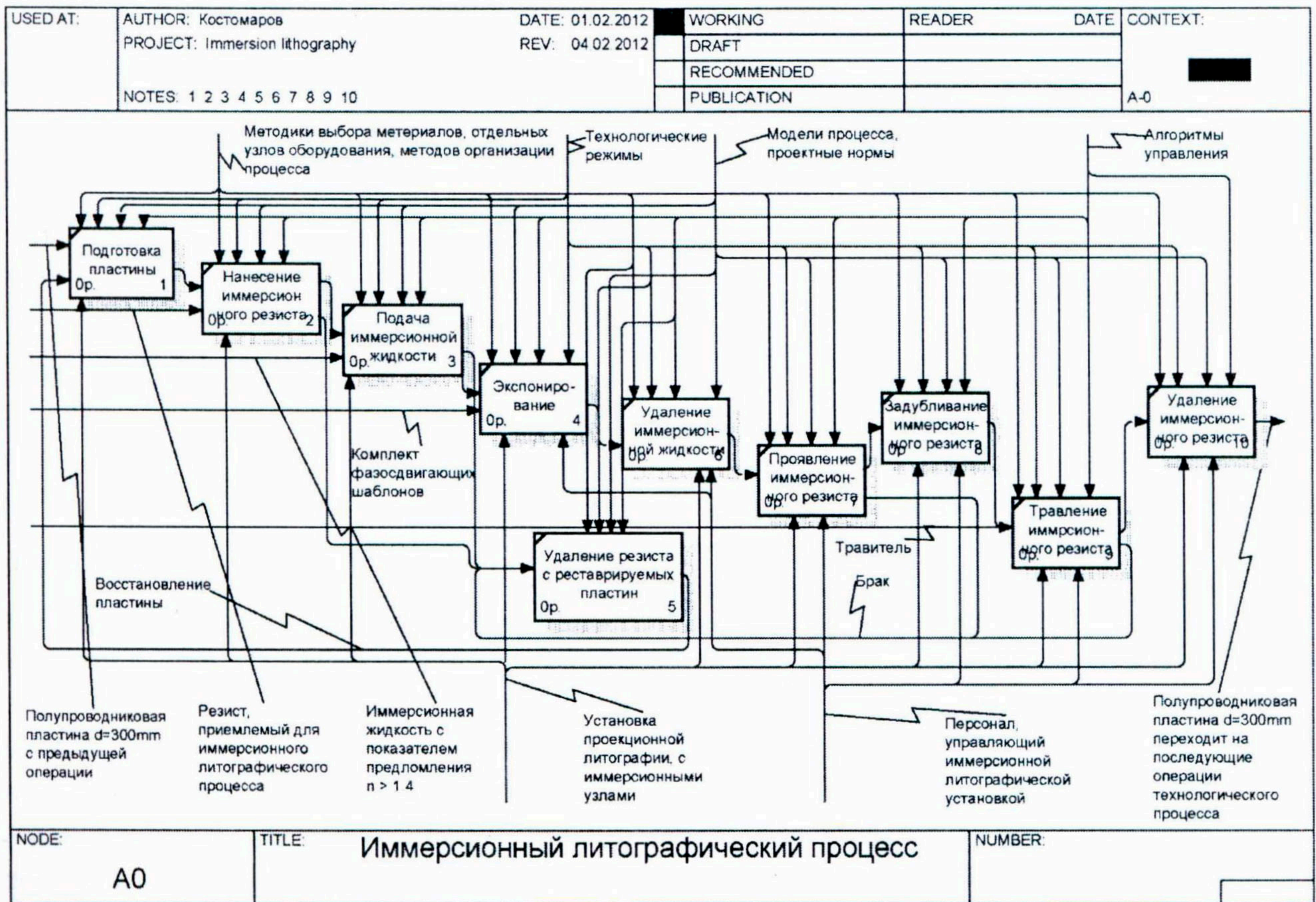


Рис. 2. IDEF0 функциональная модель иммерсионного литографического процесса

Таким образом, предварительное исследование по совмещению данных методов, позволяет создать процесс формирования топологии объектов методом иммерсионной ультрафиолетовой литографии с проектными нормами не менее 32 нм.

В процессе эксплуатации литографических систем разрешающая способность проекционной литографии ухудшается, что приводит к снижению процента выхода годных изделий. Поэтому, создание математической модели такого технологического процесса, и стратегии его технического обслуживания являются задачами актуальными и своевременными.

При создании оборудования ИУФЛ возникает проблема разработки стратегии технического обслуживания, позволяющей получить от эксплуатации системы максимально возможный эффект. Поэтому задачи профилактики ставятся как задачи экстремальные и их можно назвать оптимальными задачами надежности.

Обычно при постановке задачи профилактики предполагают заданными

характеристики надежности системы: функцию распределения времени безотказной работы системы $P(x)$ или отдельных ее частей и функцию распределения времени самостоятельного проявления отказа $\Phi(v)$ и характеристики ремонтпригодности: функции распределения времени различных восстановительных работ, допустимых к проведению в системе. Эти характеристики, а также правило (стратегия), в соответствии с которым назначаются сроки проведения восстановительных работ, определяют состояния системы и эволюцию этих состояний во времени [4].

Будим считать, что множество E возможных состояний системы является конечным $E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$. В таком случае траектории процесса $x(t)$, описывающего эволюцию состояний системы во времени, являются ступенчатыми функциями. На траекториях этого случайного процесса определим функционал, который при фиксированных характеристиках надежности будет характеризовать стратегию обслуживания исследуемой системы

[5]. За конечный отрезок времени $[0, t]$ траектория процесса $x(t)$ задается количеством переходов m , моментами переходов $t_0 = 0 < t_1 < t_2 < \dots < t_m \leq t$ и $E_{i_1}, E_{i_2}, \dots, E_{i_m}$, в которых процесс находится между моментами перехода.

Тогда функционал определим как математическое ожидание:

$$M \left\{ \sum_{k=0}^{m-1} c_{i_k} (t_{k+1} - t_k) + c_{i_m} (t - t_m) \right\}, \quad (1)$$

где константы c_i можно трактовать как доход, получаемый за единицу времени пребывания в состоянии E_i . При длительной эксплуатации ($t \rightarrow \infty$) функционал (1) стремится к бесконечности.

Следует также рассматривать удельный доход, т. е.

$$I = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} M \left\{ \sum_{k=0}^{m-1} c_{i_k} (t_{k+1} - t_k) + c_{i_m} (t - t_m) \right\}. \quad (2)$$

Выражение (1) можно переписать в виде

$$\sum_{i=1}^n c_i M(X_i(t)),$$

где $X_i(t)$ — суммарное время пребывания процесса $x(t)$ в состоянии E_i за отрезок времени $[0, t]$, а выражение (2) в виде

$$I = \sum_{i=1}^n c_i \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{M(X_i(t))}{t} = \sum_{i=1}^n c_i k_i. \quad (3)$$

Пределы, входящие в выражение (3), можно трактовать как долю времени, которую процесс $x(t)$ провел в соответствующем состоянии E_i . С другой стороны, если ввести в рассмотрение индикатор события E_i

$$\delta_{E_i}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } x(t) = E_i \\ 0, & \text{если } x(t) \neq E_i \end{cases}$$

то можно записать

$$M(X_i(t)) = \int_0^t M(\delta_{E_i}(\tau)) d\tau = \int_0^t P\{x(\tau) = E_i\} d\tau.$$

Тогда выражение

$$\frac{M(X_i(t))}{t} = \frac{1}{t} \int_0^t P\{x(\tau) = E_i\} d\tau \quad (4)$$

имеет смысл вероятности того, что в произвольно выбранный момент времени τ из отрезка $[0, t]$ имеет место событие $\{x(\tau) = E_i\}$.

Поэтому $k_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{M(X_i(t))}{t}$ можно определить как вероятность того, что в произвольно выбранный момент $\tau \in [0, \infty)$ имеет место событие $\{x(\tau) = E_i\}$.

Для регенерирующего процесса функционал I может быть определен:

$$I = \sum_{i=1}^n c_i k_i = \sum_{i=1}^n c_i \frac{M_i}{M} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i M_i}{M}, \quad (5)$$

где k_i — отношение среднего времени M_i , проведенного в состоянии E_i за период регенерации, к середине длительности этого периода M .

Поведение процесса $x(t)$ зависит от функции распределения времени безотказной работы системы $P(t)$. Функция распределения времени ξ самостоятельного проявления отказа $\Phi(x)$ и характеристик, определяющих сроки проведения регенерирующих факторов (проведение предупредительных профилактик назначается через случайное время η , распределенное по закону $G(x)$). Следовательно, от этих функций зависят и средние длительности M и M_i ($i = \overline{1, n}$).

Считаем, что период регенерации начинается в момент полного обновления системы и в этот же момент назначается очередная профилактика.

Тогда запишем

$$M = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} B(x, v, y) dG(x) d\Phi(v) dP(y),$$

$$M_i = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} A_i(x, v, y) dG(x) d\Phi(v) dP(y),$$

где через $B(x, v, y)$ обозначена средняя длительность периода регенерации процесса $x(t)$ при условии, что в начале периода начинает функционировать система, у которой время безотказной работы $\xi = y$, время самостоятельного проявления отказа $\zeta = v$, профилактика назначена через вре-

мя $\eta = x$, т. е. при условии $\{\xi = y, \zeta = v, \eta = x\}$; $A_i(x, v, y)$ среднее время пребывания процесса $x(t)$ в состоянии E_i на периоде регенирации при условии осуществления события $\{\xi = y, \zeta = v, \eta = x\}$.

Обозначим далее

$$A(x, v, y) = \sum_{i=1}^n c_i A_i(x, v, y).$$

Тогда исследуемый функционал (5) можно записать как дробно-линейный функционал вида

$$I = I(G, \Phi, P) = \frac{A(x, v, y) dG(x) d\Phi(v) dP(y)}{B(x, v, y) dG(x) d\Phi(v) dP(y)}$$

где $A(x, v, y)$ – средний доход, полученный на периоде регенерации, при условии выполнения события $\{\xi = y, \zeta = v, \eta = x\}$ [5].

Если процесс $x(t)$, описывающий эволюцию состояний системы во времени, принимает конечное множество значений и является регенирающим, то функционал, характеризующий качество работы системы, имеет вид дробно-линейного функционала (6) относительно функции распределения времени безотказной работы $P(t)$, функции распределения времени самостоятельного проявления отказа $\Phi(x)$ и функции распределения $G(x)$, определяющий периодичность проведения предупредительных профилактик.

В выражении (6) функция $A(x, v, y)$ и $B(x, v, y)$ имеют смысл условных математических ожиданий при условии выполнения события $\{\xi = y, \eta = x, \zeta = v\}$.

Эти выводы могут быть использованы при определении характеристик функционирования оборудования ИУФЛ, которое интенсивно развивается и совершенствуется в последние 15 лет.

В 2004 году компанией ASML был выпущен первый промышленный образец литографической установки, в которой была применена технология иммерсии. Благодаря этой технологии предел разрешающей способности проекционной литографии вновь был отодвинут в область глубокого субмикрона [6].

Метод ИУФЛ позволяет значительно увеличить числовую апертуру проекционных систем за счет изменения угла полного отражения на границе раздела сред объектив - воздушный зазор (между объективом и пластиной). Числовая апертура NA объектива определяется синусом максимального угла прохождения луча через объектив.

$$NA = \sin \theta_{\max}$$

Используя иммерсионные жидкости вместо воздушной среды можно получить значения $NA > 1$. Рассмотрим прохождение лучей через объектив (рис. 3). Числовая апертура определяется углом падения луча на объектив, при котором луч проходит через него, не испытывая полного отражения на границе раздела сред объектив – воздушная среда [1].

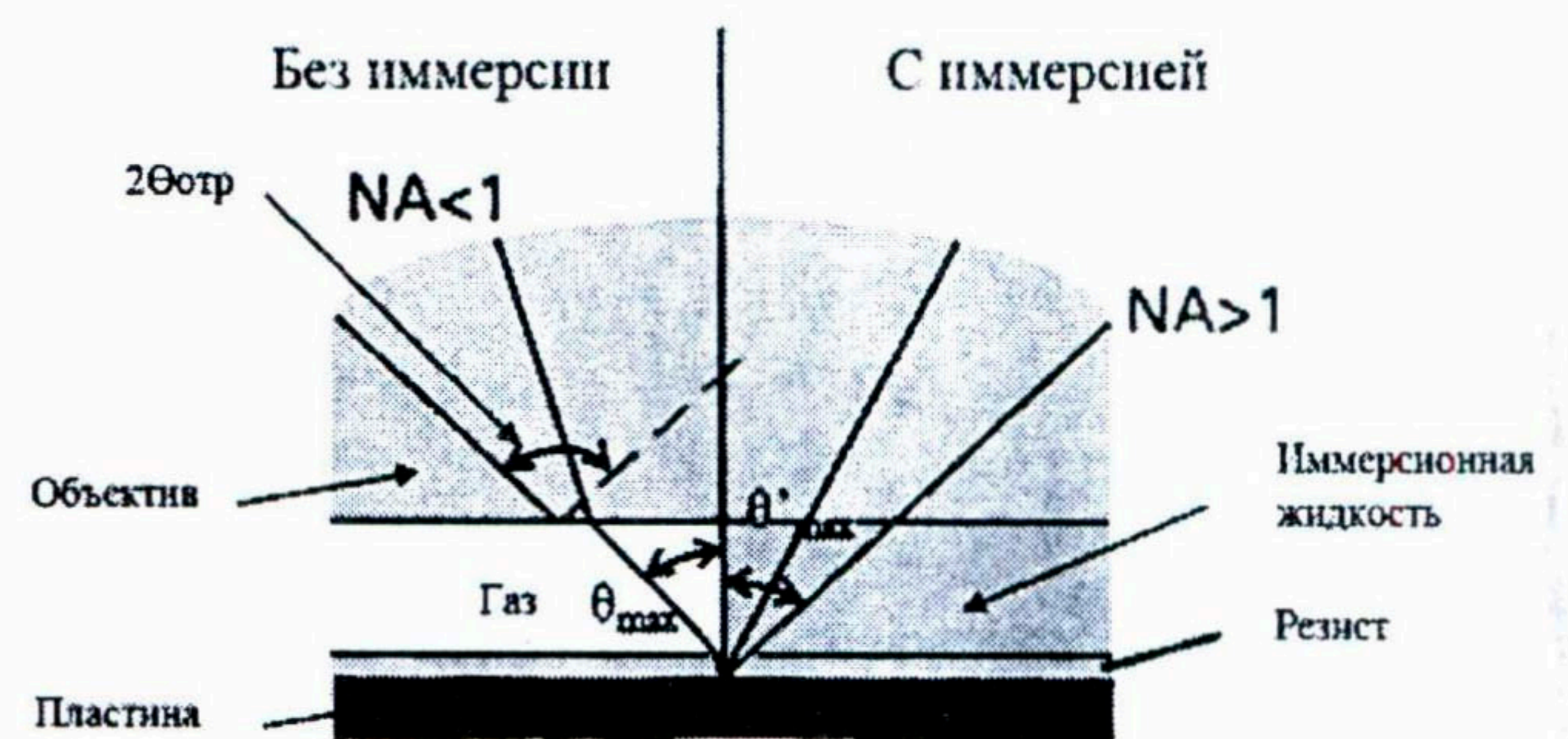


Рис. 3. Прохождение лучей через объектив

В соответствии с законом преломления получим:

$$\frac{n_{\text{объектива}}}{1} = \frac{\sin \theta_{\text{пад}}}{\sin \theta_{\max}} \text{ - без иммерсии;}$$

$$\frac{n_{\text{объектива}}}{n_{\text{медиа}}} = \frac{\sin \theta_{\text{пад}}}{\sin \theta'_{\max}} \text{ - с применением иммерсионной жидкости;}$$

$$\sin \theta'_{\max} = \frac{\sin \theta_{\text{пад}} \cdot n_{\text{медиа}}}{n_{\text{объектива}}} = n_{\text{медиа}} \cdot \sin \theta_{\max}$$

где $n_{\text{медиа}}$ – коэффициент преломления иммерсионной жидкости.

Таким образом, угол падения луча на объектив, при котором происходит полное отражение света на границе раздела сред объектив – иммерсионная жидкость, увеличивается, что влечет увеличение числовой апертуры (рис. 4). Увеличение числовой апертуры означает, что лучи, падающие под большими углами, попадут на пластину, т.е. количество информации,

пропускаемой объективом увеличится, повышая разрешение.

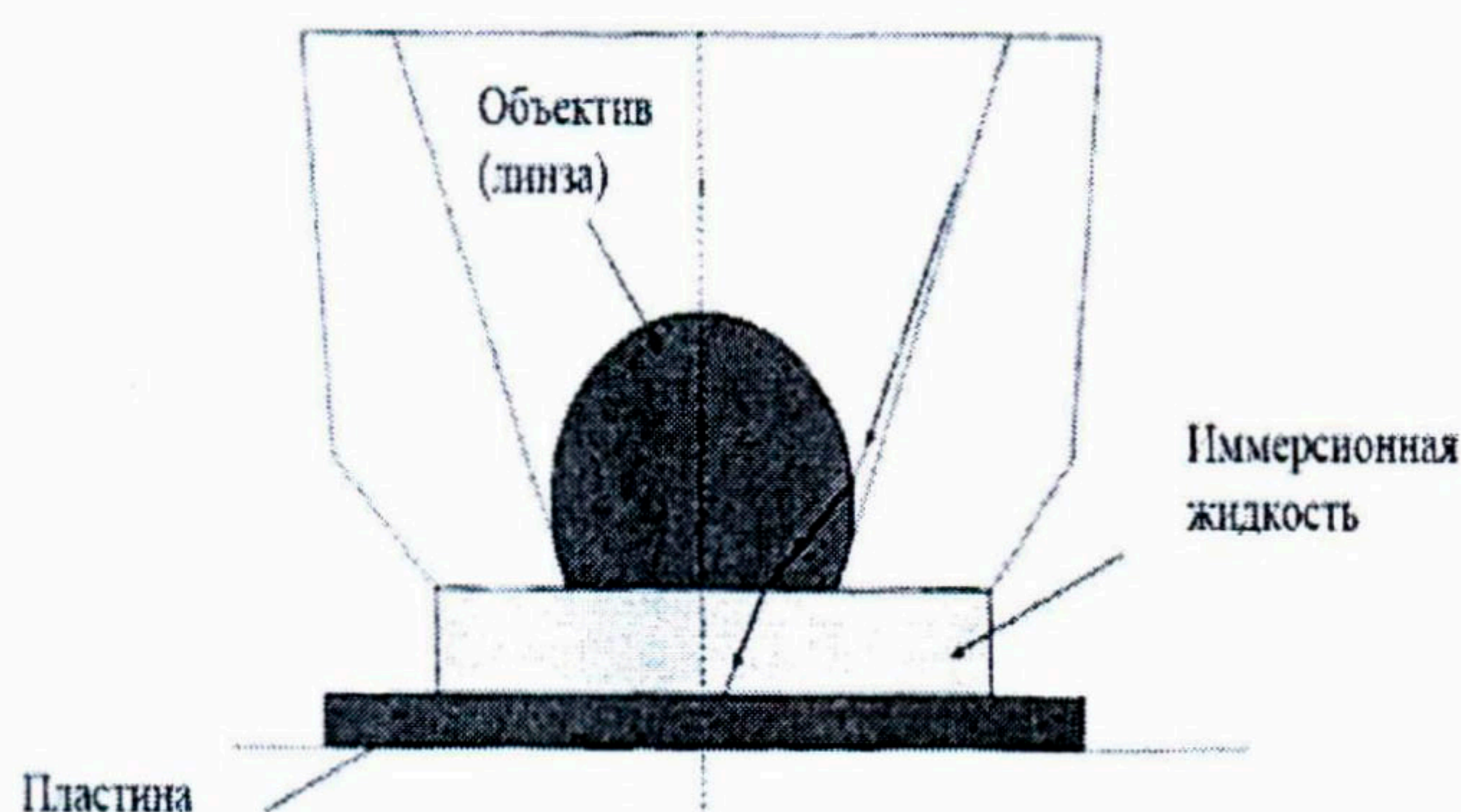


Рис. 4. Схема увеличения числовой апертуры

Числовая апертура такой система вычисляется по формуле

$$NA = n_{media} \cdot \sin \theta_{max}$$

Техническое воплощение идеи использования иммерсионных жидкостей состоит в закачке под давлением жидкости с одной стороны объектива и одновременной откачке ее с другой. Для устранения оптических искажений при прохождении луча через иммерсионную жидкость, необходимо чтобы поток закачиваемой жидкости был ламинарным.

В табл. 1 приведены значения коэффициентов преломления и получаемой числовой апертуры.

Таблица 1

| Иммерсионная жидкость | n_{media} | NA_{max} |
|-----------------------|-------------|------------|
| Деионизованная вода | 1,44 | 1,3 |
| Жидкие полимеры | 1,6 | 1,5 |

Принцип снижения проекционных размеров шаблона в литографии не потерял своей актуальности. Предложено техническое решение устройства формирования изображения на подложке, позволяющее создавать уменьшенное изображение шаблона [7].

Согласно предложенному техническому решению, источник лазерного излучения выполнен на основе глубокого ультрафиолета с длиной волны $\lambda_0=193$ нм. Отражающий шаблон выполнен из алюминия, а фокусирующая линза – из сапфира. На подложке расположена тонкая пленка жидкости высотой $h=0,3\div 0,5$ мм с показателем преломления $n>1,7$, а обращатель волнового фронта выполнен в виде полого цилиндра с жидкостью CF_3CH_2OH (трифторэтанол) [8].

Введение в устройство формирования изображения на подложке источника лазерного излучения с длиной волны $\lambda_0=193$ нм, отражающего шаблона из алюминия, фокусирующей линзы из сапфира, тонкой пленки жидкости высотой $h=0,3\div 0,5$ мм с показателем преломления $n>1,7$ расположенной на подложке и обращателя волнового фронта выполненного в виде полого цилиндра с жидкостью

CF_3CH_2OH , обеспечивает возможность формирования уменьшенного изображения шаблона на подложке.

Устройство формирования изображения на подложке (рис. 5) содержит источник лазерного излучения 2, первое полупрозрачное зеркало 3, отражающий шаблон 4, фокусирующую линзу 6 из сапфира, второе полупрозрачное зеркало 5, на подложке 1 расположена тонкая пленка жидкости 8 высотой $h=0,3\div 0,5$ мм с показателем преломления $n>1,7$, а обращатель волнового фронта 7 выполнен в виде полого цилиндра 9 с жидкостью CF_3CH_2OH .

Лазерное излучение от источника 2 проходит сквозь полупрозрачное зеркало 3, отражается от шаблона 4, попадает в среду с нерегулярными неоднородностями полупрозрачного зеркала 3 и, разделяясь, падает на второе полупрозрачное зеркало 5, после чего фокусируется сапфировой линзой 6. Расходящийся неоднородный пучок, сфокусированный сапфировой линзой 6, попадает в полый цилиндр с жидкостью CF_3CH_2OH , обладающий эффектом обращения волнового фронта, и оборачивается.

Обернутое излучение подходит к неоднородной среде второго полупрозрач-

ного зеркала 5 и, проходя через нее, становится идеально направленным. Искажения волнового фронта, появившиеся после прохождения первого полупрозрачного зеркала, компенсируются при прохождении второго полупрозрачного зеркала.

Тонкая пленка жидкости 8 высотой $h=0,3\div 0,5$ мм с показателем преломления $n>1,7$ уменьшает длину волны луча в показатель преломления $\lambda_0 = \lambda/n$.

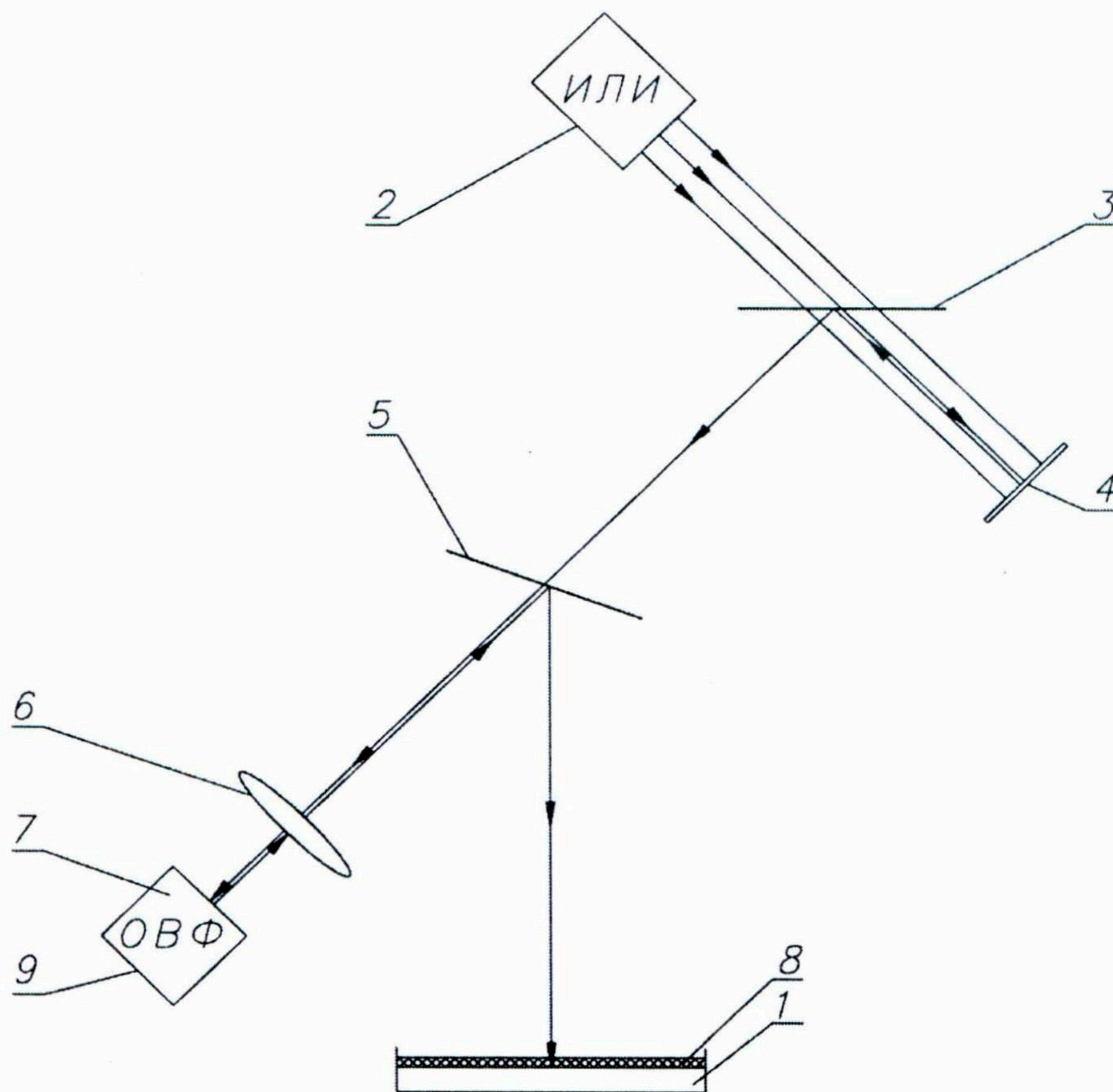


Рис. 5. Принципиальная схема устройства формирования изображения на подложке (без изображения элементов оптической системы)

Применение предлагаемого устройства формирования изображения на подложке позволяет обеспечить возможность получения уменьшенного изображения шаблона (при использовании методов повышения разрешающей способности проекционной литографии предполагается создавать элементы с проектными нормами не более 32 нм), при рабочей длине волны ультрафиолетового излучения $\lambda_0 = 193$ нм.

Сохраняющиеся на протяжении последних 20-и лет тенденции к уменьшению размеров элементов СБИС ставят перед производителями все новые задачи, как по совершенствованию литографического оборудования и самого процесса литографии, так и по внедрению новых подходов в проектировании топологий СБИС. Целями

этих задач являются повышение разрешения, ужесточение требований к допускам на размеры, их равномерности и воспроизводимости, а также точности совмещения различных топологических слоев. Однако в середине 90-х годов произошло принципиальное изменение технологии проекционной литографии, когда размеры элементов СБИС стали меньше длины волны экспонирующего излучения.

Этот переход потребовал разработки новых материалов, технологического оборудования, а также принципиально иных подходов практически ко всем операциям литографического процесса. Проблемы создания проекционных систем с источниками излучения с длиной волны меньше 193 нм поставили под угрозу тенденцию к миниатюризации размеров эле-

ментов СБИС. Поэтому особое значение приобрели конструкторско - технологические методы, позволяющие достигать разрешения выше классических значений релеевской оптики за счет учета особенностей конкретного технологического оборудования, применяемых материалов и режимов обработки.

В настоящее время передовыми производителями СБИС используются литографические установки с λ равными 365 нм, 248 нм и 193 нм. В классическом случае применения проекционной оптики минимальные размеры (Critical Dimension) элементов СБИС составляют не менее 90% от λ . Попытка дальнейшего уменьшения размеров элементов приводит к их деструкции при экспонировании в результате негативного влияния явлений дифракции и интерференции. Для решения этих проблем могут быть использованы методы повышения разрешения. Внедрение этих методов требует применения сложных САПР для функционального моделирования процессов литографии и травления, а также обработки больших массивов данных по заданным правилам. Функциональное моделирование подразумевает также обработку малых массивов данных, реализация которой осуществляется по другим правилам в частности с использованием непараметрических методов обработки неоднородной информации.

Перспективное направление «обхода» возникающих проблем – применение принципов декомпозиции систем, последовательных процедур формирования решений и методов коллективного оценивания.

Литература

1. Hand A. Double Patterning Wrings More From Immersion Lithography // Semiconductor International. 2007. January. – 17 p.

2. DailyTech IDF09 Intel Demonstrates First 22nm Chips Discusses Die Shrink Roadmap URL

<http://www.dailytech.com/IDF09+Intel+Demonstrates+First+22nm+Chips+Discusses+Die+Shrink+Roadmap/article16312.htm>

3. Cui Y. et al. Is Model-based Optical Proximity Correction Ready for Manufacturing? Study on 0.12 urn and 0.175 urn DRAM Technology // Proc. SPIE Microlithography. 2002. 4691. – P. 67-75.

4. Барзилович Е.Ю., Беляев В.А., Каштанов В.А. и др. Вопросы математической теории надежности; Под ред. Гнеденко Б.В. – М.: Радио и связь, 1983. – 376 с.

5. Барзилович Е.Ю., Каштанов В.А. Организация обслуживания при ограниченной информации о надежности системы. – М.: «Сов. радио», 1975. – 136 с.

6. IMEC. CMOS based technology R&D programs URL

http://www.imec.be/ScientificReport/SR2008/HTML/files/pdf/Brochure_CMORE.pdf

7. Корпачев М.Ю., Костомаров П.С., Лучников П.А. Формирование изображения на подложке в иммерсионной литографии // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения (INTERMATIC – 2010): Матер. VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 23-27 ноября 2010 г. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – Ч. 1. – С. 306-307.

8. Патент на полезную модель 106969 Российская федерация, МПК7 G02F 1/015. Устройство формирования изображения на подложке / П.С. Костомаров, Е.Н. Ивашов, М.Ю. Корпачев, П.С. Кузнецов, П.А. Лучников; заявитель и патентообладатель МИЭМ. – № 2010146413/28; заявл. 15.11.2010; опубл. 27.07.2011, Бюл. № 21.

ЦЕНОВЫЕ ТРЕНДЫ МОСКОВСКОГО ЖИЛЬЯ

А.Н.Вербицкий, канд. техн. наук *А.В.Николаева* (МГОУ)

Принятие новых законов в строительстве, события на политической арене страны отображается на ценовой политике

строительных компаний. В связи с внесением изменений в законодательство пересматриваются взаимоотношения застрой-