Литература

1. Кожевников А.М. Повышение оптимальности проектирования бортовых радиоэлектронных средств на основе иерархического системного макромоделирования // Информационные технологии в проектировании и производстве: Науч.-техн. журн.- ГУП ”ВИМИ”, 2003, №1, с.62-70.
2. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике: Пер. с англ. - М.: Мир, 1975. - 541с.
3. Печорина И.Н. Расчет систем автоматического управления. – М., ГНТИМЛ, 1962г.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИММЕРСИОННОЙ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ЛИТОГРАФИИ

Ивашов Е.Н, Костомаров П.С.
МИЭМ НИУ ВШЭ

Рассмотрена IDEF0 функциональная модель применительно к процессу формирования топологии объектов методом иммерсионной ультрафиолетовой литографии. Показана стратегия диагностики и технического обслуживания, которая позволяет получить от эксплуатируемого оборудования максимальный эффект. Предложено техническое решение устройства формирования изображения на подложке.

Information technology of immersion ultraviolet lithography processes modeling. Ivashov E., Kostomarov P.

The IDEF0 functional model is considered concerning the process of topology formation of the objects using ultraviolet immersion lithography. The strategy of diagnosis and maintenance is shown, which allows to get the maximal effect from the operating equipment. Technical solution of the device for imaging on a substrate is offered.

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. Улучшением данной технологии можно считать методику HydroLith, в которой измерения и позиционирование производится на сухой пластине, а экспонирование – на «мокрой» [2].

В иммерсионной 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).

Суть 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.

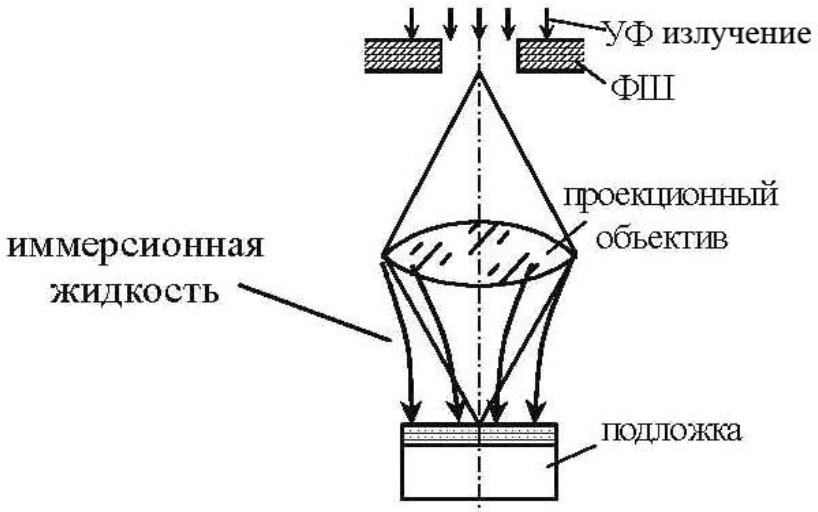


Рис. 1. *Принципиальная схема метода иммерсионной литографии*

Продолжаются исследования по поиску новых иммерсионных жидкостей с более высоким показателем преломления, составов резистов и травителей, а также новых конструкций иммерсионных систем, которые

позволят повысить разрешающую способность литографии для проектных норм не ниже 32 нм, чему способствует IDEF0 функциональное моделирование иммерсионного литографического процесса.

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

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). Но, 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.

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

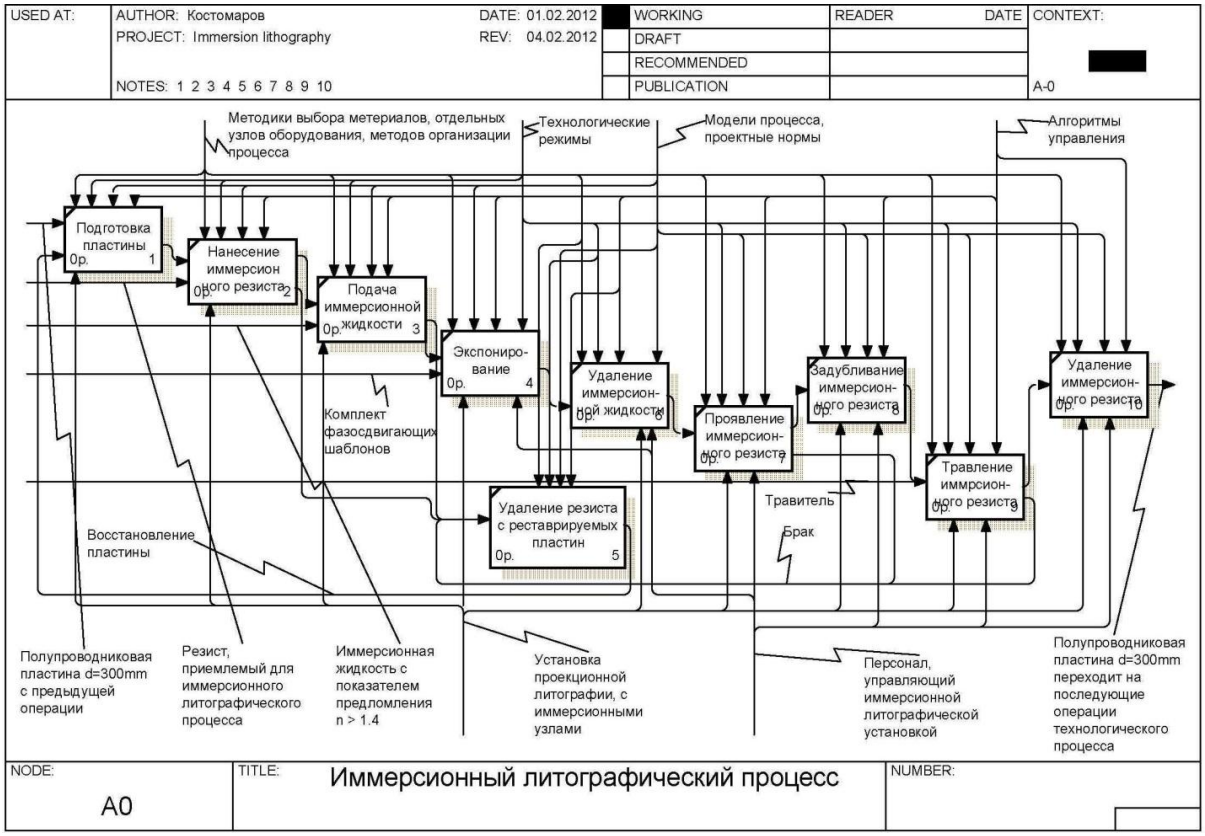


Рис. 2. *IDEF0 функциональная модель иммерсионного литографического процесса.*

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

При создании оборудования иммерсионной ультрафиолетовой литографии (ИУФЛ) возникает проблема разработки стратегии диагностики и технического обслуживания, которая позволила бы 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

ремонтопригодности: функции распределения времени различных восстановительных работ, которые можно проводить 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].

Будем 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 $E_{i_0}, E_{i_1}, \dots, E_{i_m}$, в которых процесс находится между моментами перехода. Тогда функционал определим как математическое ожидание

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

где константы c_i можно трактовать как доход, получаемый за единицу времени пребывания в состоянии E_i. При длительной эксплуатации $(t \to \infty)$ функционал (1) стремится к бесконечности. Следует также рассматривать удельный доход, т. е.

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

Выражение (1) можно переписать в виде $\sum_{i=1}^{n} c_i\, M\big(X_i(t)\big)$, *где* $X_i(t)$

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

$$I = \sum_{i=1}^{n} c_i \lim_{t\to\infty} \frac{M\big(X_i(t)\big)}{t} = \sum_{i=1}^{n} c_i\, k_i. \qquad (3)$$

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

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

Тогда выражение

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

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

Поэтому

$k_i = \lim_{t\to\infty} \frac{M\big(X_i(t)\big)}{t}$ *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 как

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

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 регенирирующих 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 время $\eta = x$, 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

$$I = I(G,\Phi,P) = \frac{A(x,v,y)\,dG(x)\,d\Phi(v)dP(y)}{B(x,v,y)dG(x)d\Phi(v)dP(y)} \qquad (6)$$

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 регенерирующим, 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.

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). NA объектива определяется синусом максимального угла прохождения луча через объектив.

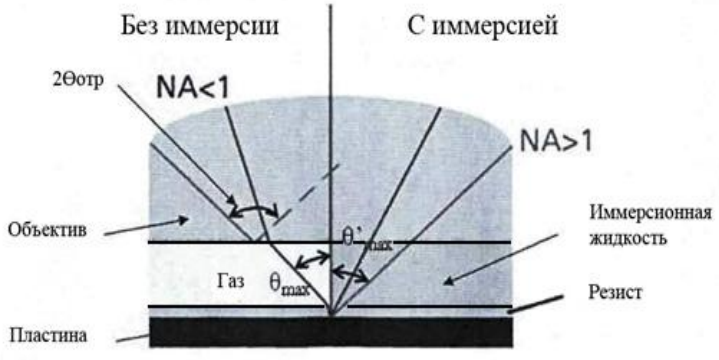


Рис. 3. *Прохождение лучей через объектив*

$$NA = \sin\Theta_{max}.$$

Используя иммерсионные жидкости вместо воздушной среды можно получить значения числовой апертуры $NA > 1$. 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].

В соответствии с законом преломления получим:

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

$$\frac{n_{объектива}}{n_{media}} = \frac{\sin\theta_{пад}}{\sin\theta'_{max}}$$ с применением иммерсионной жидкости

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

где n_{media} – 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.

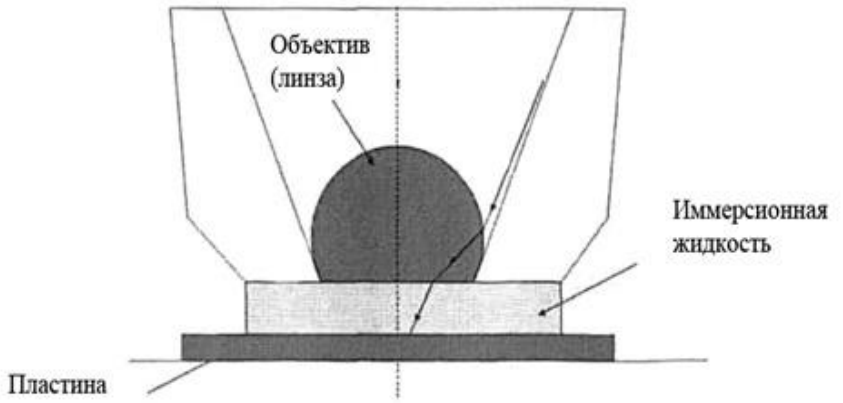


Рис. 4. *Схема увеличения числовой апертуры*

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 таблице 1 приведены значения коэффициентов преломления и получаемой числовой апертуры NA.

Таблица 1

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

Принцип снижения проекционных размеров шаблона в литографии не потерял своей актуальности. В основу предложенного технического решения положена задача обеспечить возможность формирования уменьшенного изображения шаблона на подложке [6].

Согласно предложенному техническому решению, источник лазерного излучения выполнен на основе глубокого ультрафиолета с длиной волны λ_0 = 193 нм. Отражающий шаблон выполнен из алюминия, а фокусирующая линза – из сапфира. На подложке расположена тонкая пленка жидкости высотой h = 0,3 ÷ 0,5 мм с показателем преломления n > 1,7 , а обращатель волнового фронта выполнен в виде полого цилиндра с жидкостью CF_3CH_2OH (трифторэтанол).

Введение в устройство формирования изображения на подложке источника лазерного излучения с длиной волны λ_0 = 193 нм, отражающего шаблона из алюминия, фокусирующей линзы из сапфира, тонкой пленки жидкости высотой h = 0,3 ÷ 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.

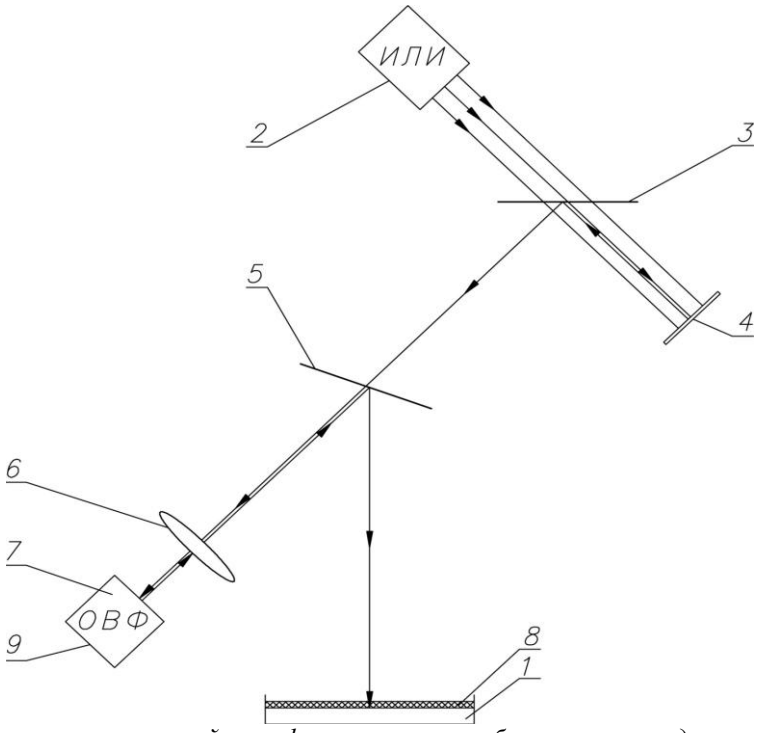


Рис. 5. *Принципиальная схема устройства формирования изображения на подложке (без изображения элементов оптической системы)*

Сущность технического решения поясняется на рис. 5, где показано устройство формирования изображения на подложке [7].

Устройство формирования изображения на подложке работает следующим образом.

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.

Обращенное излучение подходит к неоднородной среде второго полупрозрачного 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 ÷ 0,5 мм с показателем преломления n > 1,7 уменьшает длину волны луча в показатель преломления $\lambda_0 = \lambda/n$.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сохраняющиеся на протяжении последних 20 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 элементов 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.

Для функционального моделирования процессов литографии и травления, а также обработки больших массивов данных по заданным правилам требуется внедрение сложных САПР. 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. Y. Cui, 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., ил.

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

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

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ «СЛЕПОЙ» ЗОНЫ БОКОВЫХ ЗЕРКАЛ АВТОМОБИЛЯ

Крюков А.И., Палагута К.А.
Москва, ФГБОУ ВПО «МГИУ»

Рассмотрены вопросы контроля «слепой» зоны боковых зеркал автомобиля. Проанализированы существующие системы и предложен вариант системы слежения за состоянием «слепой» зоны и выработки сигналов, предупреждающих водителя и препятствующих совершению им опасных маневров. Проведено моделирование работы системы.

Modeling of active monitoring system of a «blind» spot of automobile lateral mirrors. Kryukov A. I., Palaguta K. A.

The article deals with the control of the «bliend» spot of automobile lateral mirrors. There are considered existing systems and offered the variant of simple system of tracking a condition of a «blind» spot and development of the warning signals to the driver of the interfering fulfillment by it of dangerous maneuvers. Modeling of system operation is carried out.

Среди вопросов безопасности современных транспортных средств стоит выделить понятие «слепая» зона боковых зеркал – не просматриваемая в зеркалах заднего вида область, находящаяся в соседнем ряду чуть сзади (слева и справа). В такой области может остаться незамеченным автомобиль другого участника дорожного движения. Начав перестроение в такой ситуации, водитель с высокой вероятностью может спровоцировать дорожно-транспортное происшествие (ДТП).

На данный момент существует множество разработок в области контроля состояния «слепой» зоны боковых зеркал автомобиля.

Одной из первых, разработки в данной области начала компания Volvo, представив систему BLIS (Blind Spot Information System – «система, информирующая водителя о том, что происходит на дороге в «слепой» зоне зеркал заднего вида»). Такая система работает на основе камеры, которая постоянно отслеживает ту часть дороги, которую водитель не видит в зеркало. Когда транспортное средство (автомобиль, грузовик, мотоцикл) входит в «слепую» зону обзора, рядом с соответствующим зеркалом загорается желтый индикатор, и водитель воспринимает сигнал периферическим зрением. http://www.motorland.ru/avto/4mc2005/img/0911/blis5.jpg

Система запрограммирована на обнаружение автомобилей и мотоциклов - как в дневное, так и в ночное время. Тем не менее, система BLIS функционирует на основе камеры, а это означает, что система не будет работать в условиях плохой видимости.