

Моделирование процессов иммерсионной ультрафиолетовой литографии на этапе аванпроектирования

© Авторы, 2012

Н. Н. Балан – к. т. н., Московский государственный институт электроники и математики (технический университет)

В. А. Васин – к. т. н., Московский государственный институт электроники и математики (технический университет).

E-mail: vacuumwa@list.ru

Е. Н. Ивашов – д. т. н., Московский государственный институт электроники и математики (технический университет)

П. С. Костомаров – аспирант, Московский государственный институт электроники и математики (технический университет).

E-mail: pavel.kostomarov@gmail.com

С. В. Степанчиков – к. т. н., Московский государственный институт электроники и математики (технический университет)

Предложена математическая модель непараметрической оценки плотности вероятности в условиях малых выборок, обеспечивающая возможность технического моделирования без использования реальных технологических процессов; показано, что реализация «обхода» проблем малых выборок увеличивает объем исходных данных и повышает эффективность технического моделирования; представлено устройство, формирующее дорожки диапазоном порядка 32 нм и минимальной технологической дефектностью процесса.

Ключевые слова: моделирование технологических процессов, аванпроектирование, иммерсионная ультрафиолетовая литография, рандомизированный метод оптимизации, устройство для формирования нанодорожек.

A mathematical model of non-parametric estimation of the probability density in a small sample provides an opportunity without technical modeling of real processes. Implementation of «bypass» the problem of small samples provides an increase of baseline data and improves the efficiency of technical modeling. Presented by the device that provides the possibility of forming a range of tracks about 32 nm, and a minimum of technological defect of the process.

Keywords: modeling of technological processes, advances to the design, ultraviolet immersion lithography, randomized optimization method, device for the formation of nano tracks.

Планарная технология представляет собой совокупность технологических операций, которая используется при изготовлении полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Одним из ключевых процессов планарной технологии является литография, которая заключается в формировании рельефа в диэлектрических и металлических пленках, нанесенных на поверхность полупроводниковой пластины. Ее применяют для нанесения и селективного удаления пленки двуокиси кремния над теми участками пластин, где должны быть созданы диффузионные структуры.

Требования к быстродействию вычислительных мощностей, а следовательно, к повышению степени интеграции постоянно заставляют совершенствовать планарную технологию и методы литографии: использовать новые источники излучения (уменьшая при этом длину волны), новые резисты, материалы и конструкционные параметры основных узлов литографических установок. Сохраняющиеся тенденции последних 20 лет к уменьшению размеров элементов СБИС требуют решения задач повышения разрешения, ужесточения допусков на размеры и их воспроизводимость, а также точность совмещения топологических слоев [1].

Литография состоит из ряда операций, сущность, назначение и последовательность которых являются, за редким исключением, общими для любого литографического процесса [2].

Иммерсионная литография (Immersion lithography) – это способ повышения разрешающей способности за счет заполнения воздушного промежутка между последней линзой и пленкой фоторезиста жидкостью с показателем преломления $n > 1$ (метод иммерсии). Угловое разрешение увеличивается пропорционально показателю преломления. Современные литографические установки используют в качестве жидкости высокоочищенную воду, позволяя работать с техпроцессом менее 45 нм [3]. Системы с ис-

пользованием иммерсионной литографии выпускаются лишь фирмы ASML, Nikon и Canon. Улучшением данной технологии можно считать методику HydroLith, в которой измерения и позиционирование производится на сухой пластине, а экспонирование – на «мокрой» [4].

Иммерсионная литография в 2003 и 2004 гг. рассматривалась как технология, которая продвинет применение излучения с длиной волны 193 нм до уровня критических размеров 45 нм и далее. Программа исследования иммерсионной фотолитографии на длине волны 193 нм была начата в 2004 г. с участием многих заинтересованных компаний и стремительно развивается с 2005 г. [4].

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.

Ключевая проблема иммерсионной литографии состоит в устранении дефектов, вызываемых несовместимостью фоторезиста и воды. Прогнозировали, что, если проблема дефектов будет устранена, то не остается сомнений в том, что 193 нм иммерсионная литография будет основной для формирования рисунков с критическими размерами 45 нм и 32 нм. Надо сказать, что прогнозы подтвердились.

Продолжаются исследования по поиску новых иммерсионных жидкостей с более высоким показателем преломления, которые позволяют повысить разрешающую способность литографии для проектных норм выше 32 нм [3].

На рис. 2 представлена схема иммерсионного литографического процесса.

При автоматизированном проектировании элементов, узлов и устройств литографического оборудования разработчик встречается с проблемой малых выборок, т. е. отсутствия необходимого количества эмпирических данных для принятия рационального конструктивно-технологического решения [5].

Для «обхода» проблемы малых выборок при оценивании плотностей вероятностей $p(x)$ увеличим объем исходных данных x^i , $i = \overline{1, n}$ за счет результатов статического моделирования. С этой целью в β -окрестности каждой i -й точки выборки осуществим m имитаций с законом распределения $p_2(x)$. Полученная статическая выборка $x^i + x_2^j$, $j = \overline{1, m}$, $i = \overline{1, n}$ при равновероятных значениях x^i , $i = \overline{1, n}$ соответствует смеси плотностей вероятностей:

$$\hat{p}(x) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m p_2^i(x_2^j). \quad (1)$$

Нетрудно заметить, что непараметрическая оценка (1) имеет вид

$$\hat{p}(x) = (nm)^{-1} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \hat{O}\left(\frac{x - x^i - x_2^j}{c}\right). \quad (2)$$

Существующий парадокс традиционных методов идентификации стохастических моделей состоит в сопоставлении конечной случайной выборки наблюдений переменных изучаемых объектов с конкретным набором параметров модели, оптимальном в некотором смысле. Предлагается принципиально новый рандомизированный подход определения коэффициентов размытости непараметрических решающих правил на основе процедуры их случайного выбора, который рассматривается на примере оптимизации алгоритмов формирования литографических процессов.

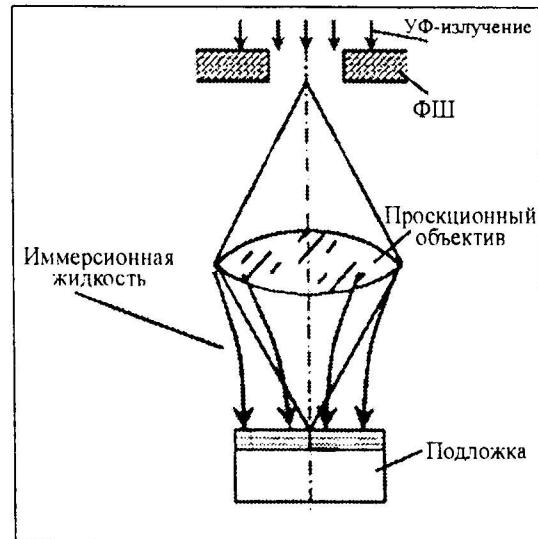


Рис. 1. Схема метода иммерсионной литографии

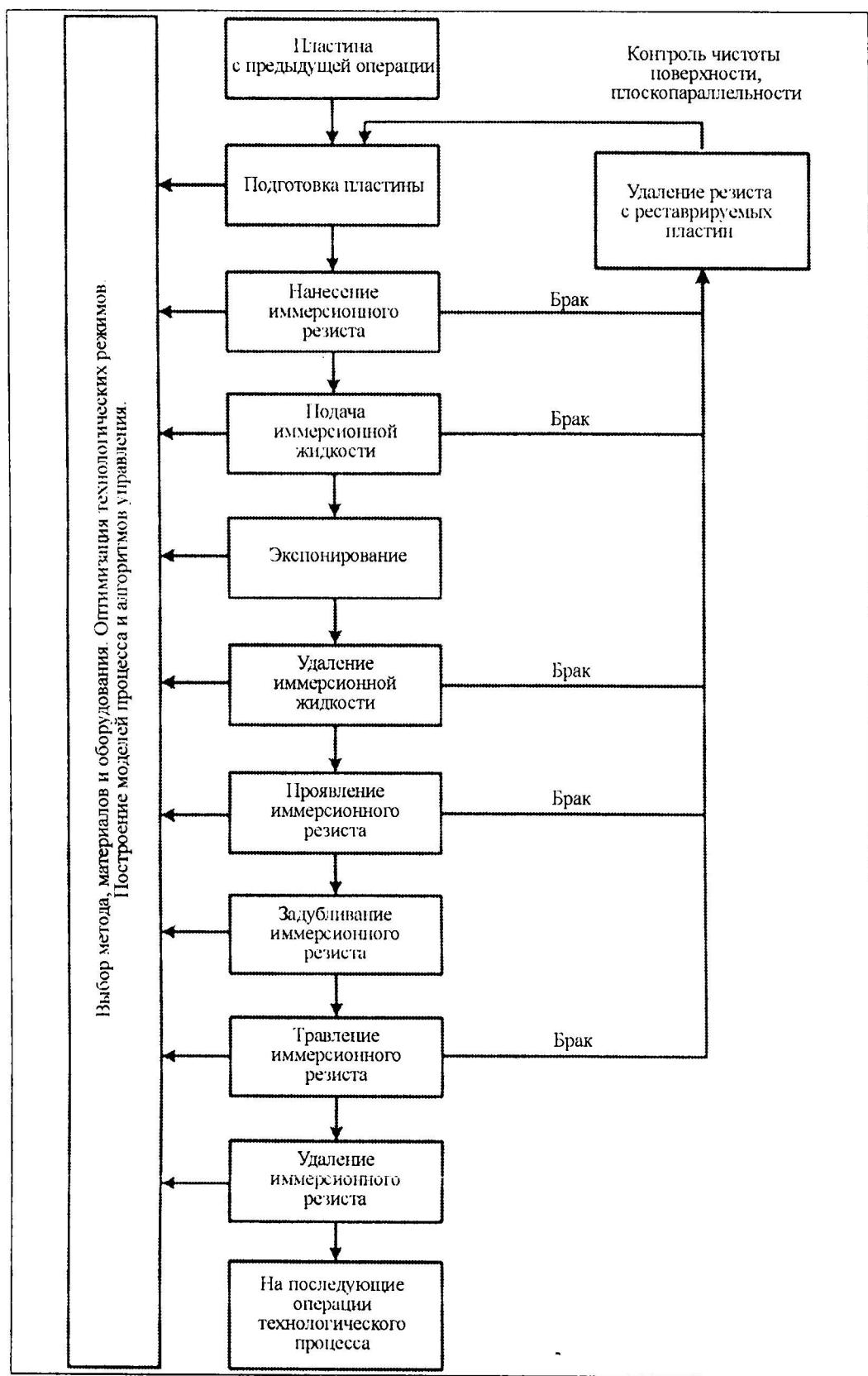


Рис. 2. Основные операции иммерсионного литографического процесса

Впервые методика случайного выбора коэффициентов размытости ядерных функций при синтезе непараметрической оценки плотности вероятности была предложена в 1975 г. Т. Вагнером [5]. Формирование случайной последовательности коэффициентов размытости при оценивании плотности вероятности $p(x)$ осуществляется на основе выборки расстояний между исходными наблюдениями ($x^i, i = \overline{1, n}$) и их k -ближайшими соседями.

Рандомизированный метод оптимизации. Пусть $V = (x^i, i = \overline{1, n})$ – выборка из n статистически независимых наблюдателей случайной величины $x \in R^1$ с плотностью вероятности $p(x)$, вид которой неизвестен. Будем считать, что $p(x)$ ограничена и непрерывна со всеми своими производными до второго порядка включительно. В качестве приближения по эмпирическим данным V искомой плотности вероятности $p(x)$ примем статистику типа Розенблатта–Парзена [6]:

$$\hat{p}(x) = (nc)^{-1} \sum_{i=1}^n \hat{O}\left(\frac{x - x^i}{c}\right), \quad (3)$$

где $\hat{O}()$ – ядерные функции, удовлетворяющие условиям положительности, симметричности и нормированности; $c=c(n)$ – последовательность положительных чисел (коэффициентов размытости) таких, что

$$\lim_{n \rightarrow \infty} c(n) = 0, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} nc(n) = \infty. \quad (4)$$

Свойства непараметрической оценки плотности вероятности (3), такие как асимптотическая несмещенность, состоятельность, сходимость почти наверное к $p(x)$, подробно рассмотрены в работе [7].

Для сравнения традиционного и рандомизированного метода оптимизации непараметрической оценки плотности вероятности определим отношение $\bar{W}(c^*) / \bar{W}_p(h^*)$ соответствующих им асимптотических выражений среднеквадратических критериев при оптимальных параметрах c и h .

Из условия минимума $W_p(c)$ и $\bar{W}_p(h)$ по c и h нетрудно получить

$$c^* = \left[\frac{\|\hat{O}\|^2}{n \|p^{(2)}(x)\|^2} \right]^{\frac{1}{5}}, \quad h^* = \left(\frac{5+t}{t} \right)^{\frac{1}{5}} c^*. \quad (5)$$

При оптимальных параметрах c^*, h^* отношение

$$\frac{\bar{W}(c^*)}{\bar{W}_p(h^*)} \sim \frac{(1 + 5t^{-1})^{\frac{1}{5}}}{1 + t^{-1}} \quad (6)$$

меньше единицы при конкретных значениях параметра t закона распределения $p(c)$ коэффициентов размытия ядерных функций.

Однако использование непараметрической оценки со случайными значениями коэффициентов размытия ядерных функций

$$\hat{p}(x) = n^{-1} \sum_{i=1}^n \frac{1}{c^i} \hat{O}\left(\frac{x - x^i}{c}\right) \quad (7)$$

позволяет снизить смещение при оценивании плотности вероятностей по сравнению с традиционной статистикой типа (3).

Можно показать, что асимптотическое выражение смещения будет в виде

$$\bar{W}_p^1(h) = \int_0^h M(\bar{p}(x) - p(x)) p(c) \sim dc \frac{h^2(t+1)}{2(t+3)} p^{(2)}(x), \quad (8)$$

а его отношение к соответствующему смещению $\bar{W}^1(c)$ для традиционной непараметрической оценки при оптимальных параметрах c^* и h^*

$$\frac{\overline{W}_P(h^*)}{\overline{W}(c^*)} \sim \frac{t+1}{t+3} \frac{(5+t)^{\frac{2}{5}}}{t}. \quad (9)$$

Если параметр t плотности вероятности $p(c) \geq 2$, то отношение (9) меньше единицы.

Анализ выражений (5), (8) показывает, что непараметрическая оценка плотности вероятности со случайными значениями коэффициентов размытости (7) обладает свойствами асимптотической несмешенности и состоятельности. Она характеризуется пониженным смещением (9) и несколько большим значением среднеквадратического отклонения (6) по сравнению с непараметрической статистикой (3). Следует ожидать проявления потенциальной эффективности непараметрической оценки плотности вероятности (7) при конечных объемах статистических данных.

Реализация «обхода» проблем малых выборок при оценивании плотностей вероятностей $p(x)$ обеспечивается также не только увеличением объема исходных данных $x^i, i = \overline{1, n}$, но и результатами технического моделирования, т. к. сложность и многообразие процессов функционирования проектируемых технических систем не всегда позволяют получать для них адекватные математические модели, сформулированные в виде различных аналитических соотношений.

Результатами технического моделирования могут быть как устройства [8], так и технологические процессы.

Рассмотрим устройство для формирования нанодорожек. Согласно предложенному техническому решению [9], источник лазерного излучения выполнен щелевым с размером щели $\delta = (2 \dots 3) \lambda$ и расстоянием между щелями $\gamma = (4 \dots 6) \lambda$ длин волн излучения. Отражатель состоит из двух зеркал, поставленных друг к другу под углом близким к 180° . Подложка закреплена на подложкодержателе, выполненным в виде кюветы с жидкостью и установленном на шестикоординатном пьезоприводе, закреплённом на неподвижном основании.

Введение в устройство для формирования нанодорожек лазерного излучения выполнено щелевым с размером щели $\delta = (2 \dots 3) \lambda$ и расстоянием между щелями $\gamma = (4 \dots 6) \lambda$ длин волн излучения, отражателя, состоящего из двух зеркал, поставленных друг к другу под углом, близким к 180° , подложки, закрепленной на подложкодержателе, выполненным в виде кюветы с жидкостью и установленном на шестикоординатном пьезоприводе, закреплённом на неподвижном основании, обеспечивает возможность формирования дорожек нанометрового диапазона.

Устройство для формирования нанодорожек, представленное на рис. 3, содержит подложку 1, источник лазерного излучения 2 и отражатель 3, причём источник лазерного излучения выполнен щелевым с размером щели 4, $\delta = (2 \dots 3) \lambda$ и расстоянием между щелями $\gamma = (4 \dots 6) \lambda$ длин волн излучения. Отражатель 3 состоит из двух зеркал 5 и 6, поставленных друг к другу под углом, близким к 180° . Подложка 1 закреплена на подложкодержателе 7, выполненным в виде кюветы 8 с жидкостью 9 и установленном на шестикоординатном пьезоприводе 10, закреплённом на неподвижном основании 11.

Источник лазерного излучения 2 формирует когерентный волновой пучок, который, выходя из источника 2, разделяется щелями 4 на систему лучей, распространяющихся вдоль параллельных прямых. Причём расстояние между соседними лучами составляет $\gamma = (4 \dots 6) \lambda$ длин волн. Далее излучение, отражаясь от зеркал 5 и 6, проходит слой жидкости 9, уменьшая длину волны пропорционально показателю преломления этой жидкости, и попадает на подложку 1. Угол между зеркалами 5 и 6 подобран так, что, достигая подложки 1, когерентные лучи интерферируют, образуя переду равнодistantных максимумов интенсивности излучения, в местах которых происходит интенсивный выброс материала подложки 1, что при необходимости перемещении шестикоординатного пьезопривода 10 обеспечивает формирование нано-

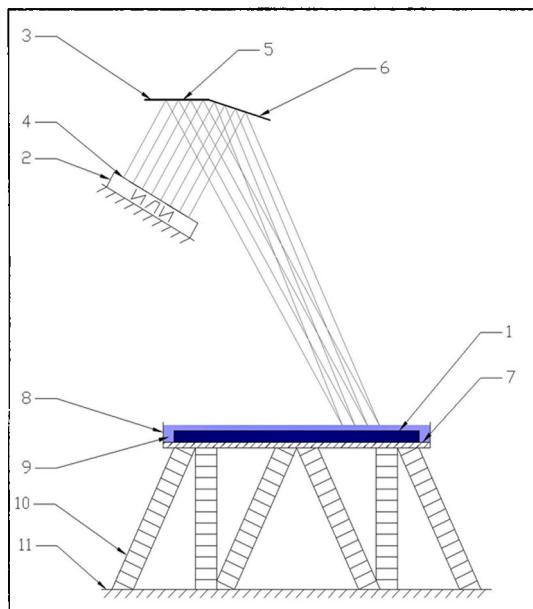


Рис. 3. Схема устройства для формирования нанодорожек (без изображения элементов оптической системы)

дорожек на подложке 1. Шаговое перемещение шестикоординатного пьезопривода 10 на (2...3) λ длины волны в направлении, перпендикулярном сформированным дорожкам, и повторение вышестоящих операций формирования нанодорожек позволит участь число дорожек на площади подложки 1.

Применение предлагаемого устройства для формирования нанодорожек позволяет обеспечить возможность формирования дорожек нанометрового диапазона (при использовании методов повышения разрешающей способности проекционной литографии предполагается получать элементы с проектными нормами не более 32 нм).

Планируется применение предложенного технического решения в ряде иммерсионных литографических установок, в частности, в установке TWINSCAN XT 1950Hi, производимой фирмой ASML. Повышение качества процесса экспонирования за счет формирования когерентного волнового пучка обеспечивается уменьшением диаметра пятна размытия, что позволяет существенно снизить технологическую дефектность процесса.

Представленная математическая модель непараметрической оценки плотности вероятности в условиях малых выборок обеспечивает возможность технического моделирования, без использования реальных технологических процессов и дорогостоящего иммерсионного литографического оборудования (стоимость одного современного литографического комплекса – свыше 40 млн евро). Реализация «обхода» проблем малых выборок обеспечивает увеличение объема исходных данных и повышает эффективность технического моделирования. Разработанное техническое устройство позволяет формировать дорожки нанометрового диапазона с проектными нормами не более 32 нм. В нем за счет когерентного волнового пучка достигается уменьшение пятна размытия, следовательно, снижается технологическая дефектность процесса.

Предложенный подход к моделированию процессов иммерсионной ультрафиолетовой литографии позволяет принимать научно обоснованные, технически целесообразные, технологически и экономически выгодные решения с целью последующего совершенствования известных и создания новых узлов установок на этапе аванпроектирования.

Литература

1. Макушин М. В., Мартынов В. В. Техника и экономика современной литографии // Фотоника. 2010. № 4.
2. Валиев К. А. Физика субмикронной литографии. М.: Наука. 1990.
3. DailyTech IDF09 Intel Demonstrates First 22nm Chips Discusses Die Shrink Roadmap URL <http://www.dailymtech.com/IDF09+Intel+Demonstrates+First+22nm+Chips+Discusses+Die+Shrink+Roadmap/article16312.htm>
4. Hand A. Double Patterning Wrings More From Immersion Lithography // Semiconductor International. 2007. January.
5. Ланко А. В., Ланко В. А. Непараметрические системы обработки неоднородной информации. Новосибирск: Наука. 2007.
6. Parzen E. On the estimation of a probability density function and mode // Ann. Math. Statist. 1962. Р. 1065.
7. Епаничников В. А. Непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности // Теория вероятности и ее применения. 1969. Т. 14. Вып. 1. С. 156 – 161.
8. Ивашов Е. Н., Корначев М. Ю., Костомаров П. С. Формированиеnanoобъектов литографическим методом // Материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (INTERMATIC – 2010) (Москва, 23 – 27 ноября 2010 г.). М.: Энергоатомиздат. 2010. Ч. 2. С. 332 – 333.
9. Патент на полезную модель 104509 Российская федерация. МПК⁷ 7H01J 37/28. Устройство для формирования нанодорожек / Е. Н. Ивашов, М. Ю. Корначев, П. С. Костомаров; заявитель и патентообладатель МИЭМ. – № 2010146415/07; заявл. 15.11.2010; опубл. 20.05.2011, Бюл. № 14.

Modeling ultraviolet lithography processes immersion stage design advances

© Authors, 2012

N. N. Balan, V. A. Vasin, E. N. Ivashov, P. S. Kostomarov, S. V. Stepanchikov

Presented in the paper the mathematical model of nonparametric probability density estimates in small samples provides the possibility of technical modeling, without the use of real-world processes and immersion lithography equipment. Implementation of «by-pass» the problem of small samples provides an increase of baseline data and improves the efficiency of technical modeling. Developed technical device provides the ability to track the formation of nanometer design rules with no more than 32 nm so in ways that reduce the blur spot is reduced, and the technological defects of the process. The proposed approach to modeling the processes of immersion lithography ultraviolet allows you to create new and improve existing technically feasible and technically attractive solution components and equipment during the design advances.