

Анализ возможностей и перспектив методов нанолитографии с позиции синергетики

Ю.Б.Цветков, Н.Г. Багдасарян, В.С. Кошик
МГТУ им. Н.Э. Баумана, РФ, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
e-mail: tsvetkov@bmstu.ru

В работе проведен анализ возможностей и перспектив методов нанолитографии, проведена их классификация по наиболее существенным признаку - способу воздействия на подложку: одновременно или последовательно резистизлучением, потоком частиц или непосредственным физико-механическим воздействием. Выделены две наиболее крупные группы технологических методов, реализующих процессы вида topdown (сверху вниз), и bottomup (снизу вверх). Показано, что во второй группе наиболее перспективны методы, реализующие синергетический принцип самоорганизации наноструктур с использованием паттерна из фоторезиста в роли аттрактора.

Analysis of nanolithography possibilities and perspectives from the position of synergetics. Yu.B. Tsvetkov, N.G. Bagdasaryan, V.S. Koshek. The analysis of the possibilities and perspectives of nanolithography methods is given. The classification of these methods is based on the most significant features - use of the resist (along with a radiation or stream of particles) or direct physical-mechanical impact. Two largest groups of technological methods are selected which implement processes in the forms of "top down" and "bottom up". It is shown that in the second group the most promising methods are those which implement the synergetic principles of self-organization of nanostructures using photo-resist pattern as an attractor.

Возможность структурирования поверхности подложки на микро- и нано уровне определяет перспективы развития ряда инновационных отраслей промышленности, включая, помимо микро- и наноэлектроники, создание микроэлектромеханических систем, инженерии биоматериалов и ряда других.

Поэтому огромные ресурсы направлены на повышение возможностей нанолитографии, исследование и разработку альтернативных методов, которые позволят синтезировать, структурировать и модифицировать поверхность подложки на уровне близком к атомарному. В результате, активная работа в этом направлении привела в последние десятилетия к разработке множества вариантов реализации нанолитографии.

Сложность и многоэтапность процессов нанолитографии, экстремальные требования к выходным параметрам, использование методов различной физической природы – все это затрудняет систематизацию информации в этой области, ее анализ, оценку, формирование целей для последующих работ.

Построение классификации методов нанолитографии затруднена в условиях современного информационного взрыва, когда обилие и плохая упорядоченность новых понятий и терминов, печатных, электронных и неопубликованных материалов затрудняют поиск и использование нужных данных, затрудняют принятие технических, организационных и даже политических решений.

Поэтому систематизация методов нанолитографии становится не только научно-технической, но и экономически важной задачей.

Существующие методы нанолитографии целесообразно разделить прежде всего в соответствии с двумя основными принципами формирования микро-и наноструктур: «сверху – вниз» (top-down) и «снизу - вверх» (bottom-up).

Реализация принципа сверху – вниз в микро- и нанотехнологии основана на традиционном использовании литографических процессов для локализация зон последующих операций– аддитивных (локальное нанесение материалов), субтрактивных (локальное травление), модификации поверхности (диффузия, ионное легирование) [1,2] (рис. 1).

Разработанные в последнее десятилетие методы литографии все чаще объединяют в себе функции локализации и непосредственно микрообработки, зачастую им приписываются и функции микросборки.



Рис. 1. Микролитография в процессах микротехнологии.

Достижения современной микро- и нанoeлектроники, реализующие принцип «сверху – вниз», базируются на хорошо проработанной системе методов, позволяющих преобразовать заданную топологию в микро- и наноструктуры на подложке (рис. 2).

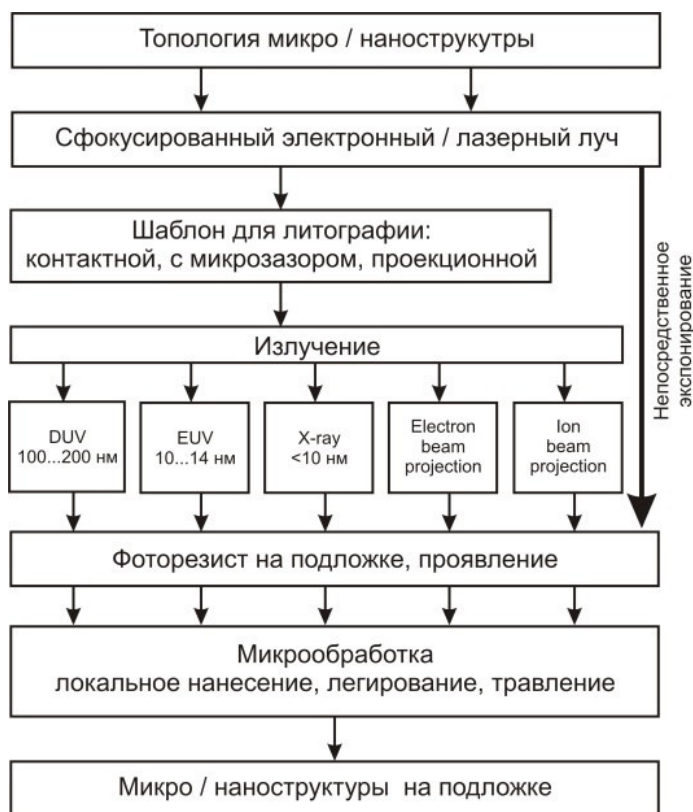


Рис.2. Система преобразования топологии в микро-наноструктуры на подложке.

Методы современной микро- и нанолитографии, построенные по этому принципу формирования микроструктур, могут быть систематизированы по следующим наиболее существенным признакам, характеризующим локализацию зоны обработки (рис. 3).

1. Последовательность структурирования поверхности подложки:
 - одновременно (через шаблон),
 - последовательно (векторное).
2. Способ воздействия на подложку:
 - предварительное структурирование резиста излучением, потоком частиц, механически,
 - непосредственное физико-механическое воздействие.

Локализация зоны обработки		Единовременно (Шаблон)		Последовательно	
Сверху вниз (Top – Down)	Структурирование резиста	излучением	Оптическое	Контакт, микроззор	
				Проекционное	
			Лазерное	Шаблон	Фокусированный луч
			Рентгеновское	Локальный источник	
		Синхротрон			
		потоком частиц	Электронное	Шаблон	Фокусированный луч
			Ионное	Шаблон	Фокусированный поток
		механически	Нанопечатная литография Imprint lithography	NanoimprintLithography	
				Hot Embossing	
				Imprinting	
	Непосредственное физико-механическое воздействие	Stencil lithography	Stencil lithography		
		Сканирующая зондовая литография	55.000 pens	АСМПерьевая Литография(dip-pen)	
				АСМ Литография - гравировка	
				АСМ Динамическая Литография - наночеканка	
				АСМ Анодно-ОкислительнаяЛитография	
		СТМ Литография			

Рис. 3. Методы литографии по принципу сверху вниз.

Разрешающая способность литографии имеет принципиальное значение для воспроизводимого формирования элементов с требуемыми нанометровыми размерами.

При этом скорость экспонирования – это ключевая характеристика пригодности литографического процесса для массового производства. Для обеспечения эффективности производства производительность этого процесса должна быть более 50 подложек в час, что предполагает скорость экспонирования не менее $1 \text{ см}^2/\text{с}$.

Этот критический барьер преодолевают только методы, предусматривающие одновременную обработку всей подложки или ее зоны, причем наиболее отработаны и реально применяются методы, предусматривающие структурирование резиста излучением и, прежде всего - оптическим излучением.

Возможность одновременного и параллельного переноса изображения многих миллионов элементарных фрагментов является основой эффективности метода и возможности достижения уровня интеграции, характеризуемого на сегодняшний день количеством в 10^7 - 10^{10} элементов (транзисторов) на чип.

По уровню достигаемого разрешения оптическая литография обеспечивает получение размеров элементов существенно менее 100 нм и, начиная с 2000-2005 годов, может далее называться нанолитографией [3].

Замена оптического излучения рентгеновским, потоками электронов и ионов – перспективная и заманчивая альтернатива фотолитографии, уступающая ей в степени решения технических проблем в практической реализации.

Методы параллельного одновременного переноса изображений механическим способом (нанопечатная литография, *imprint lithography*), непосредственной нанообработки через прецизионный шаблон (*stencil lithography*) являются наиболее реальными альтернативами фотолитографии и по этой причине интенсивно прорабатываются в последние годы [4].

Все методы локального последовательного воздействия на подложку как через резист, так и непосредственно обеспечивают разрешение от десятков до единиц нанометров, однако малая производительность определяет им сферу экспериментального производства, отработки опытных образцов изделий нанотехнологии.

Приближение размеров формируемых микро- и наноструктур к размерам молекул стимулировало переход к альтернативному принципу их структурирования и формообразования – снизу вверх (*bottom-up*).

Основой этого принципа является самоорганизация молекул для формообразования наноструктур заданного вида и свойств на уровне функциональных групп молекул. Формирующиеся на основе самоорганизации структуры более устойчивы с точки зрения термодинамики, они не имеют дефектов и зачастую приобретают способность к самовосстановлению.

Это открывает широкие возможности использования природных свойств ряда материалов для создания наноструктурированных 2D материалов.

Процессы самоорганизации, хорошо изученные при создании трехмерных композитов, например, на основе опаловых матриц [5], в нанолитографии приобретают ряд особенностей.

Характерные для синергетических процессов преимущества направленной самоорганизации блок-сополимеров позволяют получать массивы монослоев с нанометровыми размерами отдельно расположенных нитей.

Развитием синергетического процесса самоорганизации в данном случае является введение в систему аттрактора, задающего новое устойчивое состояние и новую структуру формирующейся наноструктуры.

Таким аттрактором в процессах направленной самоорганизации (*selfdirected assembly*) при нанолитографии выступает так называемый топографический или химический паттерн (*pattern* – шаблон), создаваемый в фоторезисте традиционными литографическими методами (рис. 4). Использование паттернов в качестве аттракторов применительно к самоорганизованным молекулам блок-сополимера не только задает требуемое направление их расположения, но и обеспечивает мультипликацию частоты паттерна в 3-4 раза [6,7].

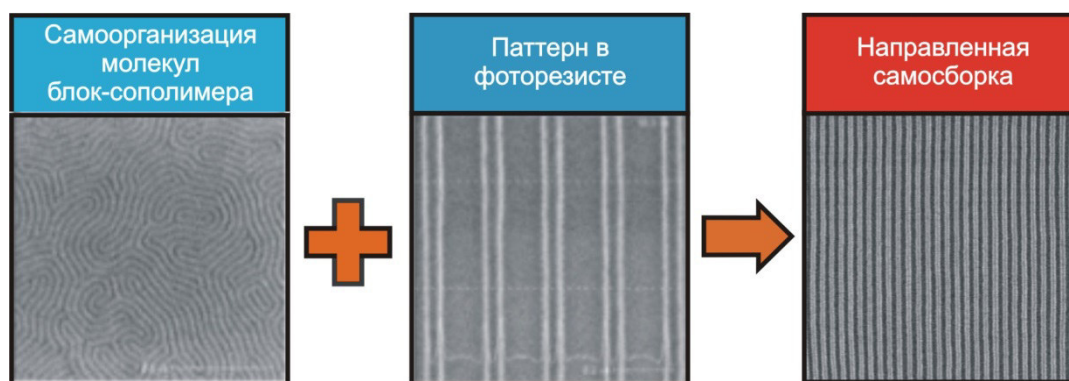


Рис. 4. Направленная самосборка молекул воздействием паттерна (аттрактора).

Заключение

Проведенная систематизация методов нанолитографии по наиболее существенным признакам, характеризующим локализацию зоны обработки, позволяет выделить в них группы методов, реализованных и перспективных для промышленной обработки изделий. Это методы, обеспечивающие групповую одновременную обработку через шаблоны различного вида, как с использованием резиста, так и с непосредственным воздействием на подложку.

Методы векторной, последовательной обработки сфокусированным излучением и зондами атомно-силовых микроскопов обеспечивают предельное, вплоть до молекулярного уровня разрешение. Обладая малой производительностью, они перспективны в создании опытных образцов изделий нанотехнологии, при отработке процессов наноструктурирования.

Перспективным представляется реализация принципа «снизу-вверх» за счет объединения синергетического процесса самоорганизации молекул блок-сополимера с предварительным созданием паттерна в фоторезисте, который выполняет роль своеобразного аттрактора и придает наноструктурам соответствующее направление и мультиплицирует их частоту.

Литература

1. Цветков Ю.Б. Управление топологической точностью фотолитографии. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2005. – 176 с.
2. Физические основы микро- и нанотехнологий / С.П. Бычков, В.П. Михайлов, Ю.В. Панфилов, Ю.Б. Цветков; Под ред. Ю.Б. Цветкова. - М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.
3. Сейсян Р.П. Нанолитография в микроэлектронике (обзор) / Журнал технической физики. 2011. Т. 81. № 8. С. 1-14.
4. Ke Du, Junjun Ding, Yuyang Liu, Ishan Wathuthanthriand Chang-Hwan Choi. Stencil Lithography for Scalable Micro- and Nanomanufacturing. *Micromachines* 2017, 8(4), 131.
5. Ринкевич А.Б, Бурханов А.М., Самойлович М.И., Белянин А.Ф., 3D-нанокompозитные металлodieлектрические материалы на основе опаловых матриц *Российский химический журнал* 2012 56 (1-2), 26-35
6. Minghao Qi (2016), ECE 695Q: Nanometer Scale Patterning and Processing, <https://nanohub.org/resources/24028>. Purdue University
7. Seong-Jun Jeong, Ju Young Kim, Bong Hoon Kim, Hyoung-Seok Moon, Sang Ouk Kim. Directed self-assembly of block copolymers for next generation nanolithography *Volume 16, Issue 12, December 2013, Pages 468-476*.