

Фотолитография с теневым экспонированием: состояние и перспективы

Ю.Б. Цветков

Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

e-mail: tsvetkov@bmstu.ru

Проведен анализ возможностей и перспектив систем фотолитографии с теневым экспонированием. Приведена классификация систем на основе выделения в технологических комплексах наиболее существенных объектов рассмотрения: целей, методов, средств (оборудования). Выделены две наиболее крупные группы технологических методов, реализующих процессы в контакте и микрозазоре, проанализированы методы повышения разрешения теневой фотолитографии, направления и достижения в области разработки соответствующего оборудования. Выявлены направления развития систем теневой фотолитографии для достижения субволнового разрешения.

Photolithography systems with shadow exposure. Yu.B. Tsvetkov. The analysis of the capabilities and prospects of photolithography systems with shadow exposure is made. The classification of systems based on the allocation in technological complexes of the most essential objects of consideration: goals, methods, means (equipment) is given. The two largest groups of technological methods that implement processes in contact and microgap are identified, methods for increasing the resolution of shadow photolithography, directions and achievements in the development of appropriate equipment are analyzed. The directions of the development of shadow photolithography systems to achieve sub-wave resolution are revealed.

Введение

Ключевым процессом микро- нанотехнологий, обеспечивающим локализацию зон обработки и возможность одновременного формирования с структур микронными и нанометровыми размерами элементов, является микролитография.

Исторически первым видом микролитографии является фотолитография с теневым экспонированием (shadowprinting). В этом методе экспонирование фоторезиста на подложке ультрафиолетовым излучением через фотошаблон проводится при создании между ними плотного контакта (contact) или контролируемого микрозазора (proximity) (рис. 1).

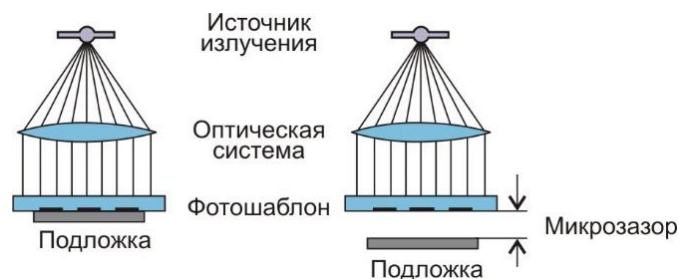


Рис. 1. Экспонирование в контакте и с микрозазором.

Важным достоинством фотолитографии с теневым экспонированием является одновременная передача топологии фотошаблона на всю рабочую поверхность подложки. Применяемые для этого установки совмещения и экспонирования (УСЭ, maskaligners) были доминирующим инструментом литографии в течение первых 20 лет полупроводниковой промышленности.

Начиная с 1980-х годов индустрия перешла на проекционную литографию. Однако УСЭ не только не были ликвидированы, напротив, ежегодно производится сотни установок этого

типа. Функциональные возможности современных УСЭ значительно расширились, они могут в автоматическом режиме обрабатывать пластины диаметром до 300 мм обеспечивая высокую производительность и рентабельность процесса [1].

Этот стабильный успех фотолитографии с теневым экспонированием объясняется, прежде всего, тем, что стоимость альтернативного проекционного оборудования для микролитографии удваивается примерно каждые 4,4 года. При этом, число функциональных слоев на пластине возросло до более чем 35 слоев [1].

Поэтому экономичные и очень надежные УСЭ по-прежнему широко используются для формирования некритических слоев интегральных микросхем, так же как при изготовлении широкого круга микро- и наносистем.

Не менее важным направлением развития фотолитографии с теневым экспонированием является разработка способов повышения разрешения метода до нанометрового уровня. Это особенно важно при отработке перспективных технологий в рамках научно-исследовательских работ в университетских лабораториях, исследовательских центрах, при запуске малых предприятий.

Все это послужило причиной возрождения на новом витке развития микротехнологий систем экспонирования для теневой фотолитографии.

Цель обзора - сравнительный анализ современных методов фотолитографии с теневым экспонированием для расширения представлений об этих методах и их возможностях в современной микро- нанотехнологии.

Теневое экспонирование: классификация и анализ

Методологически теневую фотолитографию целесообразно рассматривать как технологический комплекс, понимая под технологией совокупность методов и средств для достижения заданных целей. Объектами рассмотрения в данном случае становятся цели, методы, средства (оборудование) теневой фотолитографии (таблица 1).

Цели теневой фотолитографии определяют широкий спектр ее возможных применений – как в традиционных для микротехнологии процессах, так и в инновационных, требующих достижения экстремального, вплоть до субволнового разрешения.

Этим объясняется множество различных методов и средств, разработанных начиная с полувексовых разработок вплоть до исследований последних лет.

Таблица 1. Объекты рассмотрения технологических комплексов теневой фотолитографии.

Цели	<ul style="list-style-type: none">• Обеспечение высокой производительности и рентабельности при формировании широкого круга микроструктур с размерами от 2-3 мкм• Достижение субмикронного и субволнового разрешения в условиях прототипного, опытного производства
Методы	<ul style="list-style-type: none">• Способы экспонирования• Методы повышения разрешения
Средства - оборудование, инструменты	<ul style="list-style-type: none">• Фотошаблон для передачи заданной топологии\• Источник излучения (длина волны)• Оптическая система формирования потока излучения• Устройство создания контакта или заданного микрозазора

Методы теневой фотолитографии включают способы экспонирования и методы повышения разрешения процесса.

Совокупность *способов экспонирования* в теневой фотолитографии можно представить

в следующей классификации (таблица 2).

Современные УСЭ позволяют проводить процесс в двух вариантах размещения фотошаблона относительно подложки:

- в контакте,
- с микрозазором.

Таблица 2. Классификация способов экспонирования в теневой фотолитографии.

СПОСОБ ЭКСПОНИРОВАНИЯ	КОНТАКТ		ЗОНА ЭКСПОНИРОВАНИЯ	ПРИЖИМ	ФОТОРЕЗИСТ
		Жесткий	Фотошаблон	<ul style="list-style-type: none"> • Все поле 	<ul style="list-style-type: none"> • Мягкий • Плотный • Вакуумный
Ближнеполевой	Гибкий	Фотошаблон	<ul style="list-style-type: none"> • Все поле • Модуль 	Вакуумный	Субволновой
		Подложка	<ul style="list-style-type: none"> • Все поле 		
	Конформный	Рельефный эластичный фотошаблон	<ul style="list-style-type: none"> • Выступы рельефа • Краевой фазовый сдвиг • Зонды на выступах • Наклонные грани выступов 	Адгезионный	Двухслойный
	МИКРОАЗОР		Дифракционное фокусирование Эффект Талбота	<ul style="list-style-type: none"> • Все поле 	

Основная задача первого варианта – обеспечить максимально плотный контакт подложки и фотошаблона, во-первых, для максимального уменьшения дифракционных явлений, в том числе – в ближнем поле (*nearfield*). Второй вариант применяется для экономичного обеспечения приемлемого разрешения с уменьшением побочных явлений контактного метода – повреждений и износа фотошаблона при контактах, а также при для реализации ряда оптических явлений, способствующих достижению высокого разрешения.

Контактное экспонирование

Для полной реализации потенциальных возможностей метода необходимо обеспечить оптический контакт фотошаблона и подложки, т.е. максимально плотное и полное прилегание их рабочих поверхностей друг к другу. Однако в реальных условиях такой контакт невозможен. Исходная неплоскостность подложки, возрастающая после высокотемпературных технологических операций, неравномерность толщины слоя фоторезиста, микрочастицы, попадающие между фотошаблоном и подложкой – все это препятствует равномерному плотному контакту.

Стремление в полной мере использовать возможности контактного экспонирования привело к его разнообразным модификациям и совершенствованию. Можно выделить три (до недавнего времени – два [2]) основных варианта контакта фотошаблона и подложки:

- жесткий (*rigid*)
- гибкий (*flexible*)
- конформный (*conformal*)

Жесткий контакт двух твердых тел может достигаться различными способами (таблица 3):

- механическим пружинным прижимом,
- дополнительной подачей давления азота под поверхность подложки,
- дополнительным вакуумированием полости между фотошаблоном и подложкой.

Таблица 3. Виды контакта.

Контакт	Определение	Давление, Н/см ²	Разрешение, мкм
Мягкий	Пружинный прижим подложки к фотошаблону.	0,05	2
Плотный	Дополнительная подача давления азота под подложку	0,22	1
Вакуумный	Вакуумирование полости между фотошаблоном и подложкой.	3	0,8

Гибкий контакт обеспечивающий более плотное прилегание фотошаблона и подложки друг к другу, основан на применении тонких стеклянных фотошаблонов (0,15-0,25 мм), обеспечивающих более полное прилегание к подложке при обычном механическом прижиге.

Вариантом метода является использование гибкости достаточно тонких подложек. При вакуумном прижиге таких подложек к тонким кварцевым фотошаблонам совместно с использованием источника короткого ультрафиолета (0,2-0,26 мкм) получены линии шириной 0,5 мкм с зазорами 0,25 мкм между ними [3].

Уменьшение толщины фотошаблонов до 0,15 мм, использование в качестве основы плавного кварца, в нижний слой которого внедрен маскирующий рисунок из хрома толщиной 40 нм, позволило получить рисунок с шириной линия / зазор 100 нм [4,5].

Обеспечение плотного контакта по всему рабочему полю двух хоть и гибких, но твердых, хрупких объектов (кварцевого фотошаблона и кремниевой подложки) ограничено из-за микрочастиц между ними и локальной неплоскостности подложки.

Конформный контакт основан на применении фотошаблонов из эластомеров – эластичных и упругих полимеров, восстанавливающих свою форму после снятия напряжения. Наиболее часто используемый материал для изготовления конформных фотошаблонов - полидиметилсилоксан (*PDMS*) обладает малым модулем упругости и высокой прочностью.

Рабочие поверхности таких эластичных шаблонов выполняются рельефными так, чтобы контактировать с подложкой только выступами, образуя конформный контакт с полным прилеганием. Конформный контакт с рельефными эластичными фотошаблонами позволяет осуществить:

- ввод излучения в локализованных плотным контактом участках,
- редукцию изображения за счет краевого фазового сдвига.

Метод локализации контактирующих участков фотошаблона для ввода излучения реализуется за счет формирования на эластичных фотошаблонах выступов, контактирующих с фоторезистом, на которых формируется топология микроструктур. Эти выступы выполняют роль световодов, проводящих излучение к поверхности фоторезиста (*LightCouplingMask - LCM*)[5].

Расчетанный предел разрешения LCM метода составляет $\lambda/2n$. Для апробированных параметров $\lambda = 256$ нм и $n=1,6$ получены рельефы в фоторезисте шириной 100 нм, что близко к расчетному значению [6].

Формирование субволновых изображений за счет краевого фазового сдвига основано на использовании эластомерного фотошаблона, аналогичного LCM с рельефными выступами на рабочей поверхности. При конформном контакте с фоторезистом на краях выступов возможен фазовый сдвиг, возникающий при взаимодействии соседних волн, проходящих через эластомер и воздушный зазор соответственно.

Максимальный контраст этого типа получается, если фазовая задержка между волнами составляет π . Этот эффект проявляется только при соблюдении определенного соотношения длины волны излучения и высоты рельефа [7,8,9].

Высота выступов выбирается из условия сдвига фаз соседних волн на $n \times \pi$, обеспечивая нулевую интенсивность излучения. Ширина зоны с минимальной интенсивностью излучения в среде фоторезиста составляет около четверти длины волны экспонирующего излучения (90-100 нм) [7,8]. Метод позволяет получать как выступающие рельефы, так и узкие углубления, соответственно, в позитивном и в обрабатываемом фоторезистах [10,11,12]. Уточненные расчеты процессов в ближнем поле предсказывают возможность получения параллельных линий шириной 50 нм [13,14], в работе [15] получены углубленные и выступающие рельефы шириной 30-50 нм.

Экспонирование с микрозазором

Контролируемый микрозазор может служить основой проявления оптических явлений, способствующих существенному повышению разрешения. К числу таких явлений относятся дифракционное фокусирование и эффект Тальбота.

Дифракционное фокусирование. При определенных соотношениях между микрозазором, длиной волны излучения и шириной окна на фотошаблоне возможно формирование распределения интенсивности в виде узкого пика.

Ширина кривой распределения интенсивности в зоне пика может быть меньше ширины основания кривой в 3-4 раза. При подборе соответствующего времени экспонирования можно достичь в зоне пиковой интенсивности такой локальной экспозиции, что при экспонировании проявится участок фоторезиста только в этой зоне. При этом в фоторезисте получится микрорельеф, ширина которого значительно меньше, чем размер окна на фотошаблоне

Это явление, проявляющееся как дифракционное фокусирование и аналогичное действию однозонной линзы Френеля, описанное в [16] и экспериментально исследованное [17] стало вновь популярным через 15-20 лет с появлением рентгенолитографии [18,19,20] и экстремального ультрафиолета [21]. В этих системах малая длина волны излучения позволяет рассматривать применение дифракционного фокусирования (*critical condition*) в нанометровом диапазоне (25-100 нм). При этом расчетные значения микрозазора при экспонировании составляют от единиц до десятков микрометров и даже более 100 мкм [30], что вполне реализуемо в современном литографическом оборудовании.

Эффект Тальбота. Проявляется при экспонировании регулярных структур, аналогичных дифракционным решеткам. При падении плоской волны на периодическую дифракционную решетку, изображение решетки повторяется на регулярном расстоянии от ее плоскости. Это расстояние называется длиной Тальбота, а повторяющиеся изображения - самоизображениями.

Кроме того, на половине длины Тальбота также возникает самоизображение, но смещенное по фазе на половину периода. При меньших долях длины Тальбота также можно наблюдать фрактальную структуру субизображений с постоянно уменьшающимся размером, часто называемым ковром Тальбота [21-30]. Метод реализован на серийных УСЭ МА6, МА8 фирмы SUSS MicroTec, позволив получить разрешение 600-800 нм при микрозазорах 60-100 мкм [26].

Глубина резкости плоскостей Тальбота (depthoffield - DOF) масштабируется пропорционально квадрату периода решетки. Например, для рисунка с периодом 400 нм и с длиной волны 365 нм, DOF составляет всего около 50 нм. Это предъявляет жесткие требования к плоскостности подложки и механизму юстировки. Для преодоления проблемы малой глубины резкости плоскостей Тальбота предложено использовать источник, имеющий более

широкий спектр длин волн, которые, перекрываясь, расширяют DOF[27]. Аналогичный результат получен за счет динамического изменения расстояния между фотошаблоном и подложкой во время экспонирования - Displacement Talbot lithography (DTL) [28]. Практическая реализация этого подхода на серийных УСЭ ведется с дискретными (200 нм) перемещениями во время экспонирования [29, 30].

В обобщающей работе [31] показана возможность достижения разрешения менее 100 нм на больших полях методом DTL в обычных фоторезистах.

Методы повышения разрешения

Фазосдвигающие шаблоны и коррекция оптической близости

Применение взамен традиционных бинарных шаблонов, регулирующих амплитудное пропускание излучения, шаблонов с комплексной функцией пропускания o – фазосдвигающих шаблонов (PhaseShiftMask – PSM) известно с 1980-х годов [32]. и подробно исследовано применительно к проекционному экспонированию [33].

Аналогичные шаблоны, модулирующие фазу и выполняющие коррекцию оптической близости (OpticalProximityCorrection – OPC) [34], находят все большее распространение в качестве средства повышения разрешения теневой фотолитографии. Реализующие обе эти функции фотошаблоны (Wave-OpticalMask) [35] обеспечивают получение разрешения 3 мкм линия/зазор. Применение лазерного источника излучения с длиной волны 368,3 нм позволило довести разрешение до 1,5 мкм при зазоре 50 мкм [36]. Использование рельефных кварцевых фазосдвигающих фотошаблонов позволило при изготовлении дифракционной решетки получить период 800 нм (1250 линий/мм) [37].

Поверхностные плазмон-поляритоны

Поверхностные плазмон-поляритоны (surface plasmon polariton SPP) - это коллективные движения (волны) поверхностных электронов на границе раздела металла и диэлектрика.

SPP могут возбуждаться оптическим излучением, действующим на металлические пленки на поверхности диэлектрика. Проходя через оптическую среду с относительно большим показателем преломления, например, стекло фотошаблона, излучение проникает в металл и возбуждает колебания свободных электронов металла (электронной плазмы – отсюда и название "плазмоны"). В этой плазме возникают поверхностные плазмонные волны электронов металла (электронной плазмы, – отсюда и название "плазмоны").

Энергия колебаний плазмонной волны сосредоточена в очень тонком (100-200 нм) слое возле поверхности металлической пленки. Скорость распространения плазмонной волны в несколько раз меньше скорости света в вакууме. Поэтому при той же частоте колебаний длина плазмонной волны во столько же раз меньше, чем длина волны света в вакууме. Благодаря этому плазмонные волны удается сконцентрировать на участке намного меньших размеров, чем световой пучок. В практической реализации метода алюминиевая пленка (плазмонная маска) толщиной 80 нм на поверхности кварцевого шаблона контактировала с пленкой фоторезиста SU-8 (спейсером) толщиной 30 нм. В маске реактивным ионным травлением были получены отверстия диаметров 40 нм с шагом 170 нм. Экспонирование ультрафиолетовым излучением (365 нм) позволило получить набор микроструктур с размером 90 нм, т.е. равным четверти длины экспонирующего излучения [38]. Анализ возможностей, ограничений и перспектив развития метода на основе поверхностных плазмон-поляритонов приведен в работах последних лет [39-41].

Средства теневой фотолитографии: оборудование, инструменты

Оборудование для теневой фотолитографии – установки совмещения и экспонирования (УСЭ) – прошли пятидесятилетний путь развития от ручных установок для обработки подложек диаметром 25 мм, до автоматизированных комплексов, обеспечивающих субмикронное и нанометровое разрешение на подложках до 300 мм.

Современные УСЭ представляют собой комплексные системы, способные реализовать все способы теневого экспонирования, как контактные, так и с микрозазором, совместно с методами повышения разрешения процесса. Ключевыми подсистемами УСЭ применительно к формированию микроизображения являются:

- источник излучения,
- оптическая система формирования потока излучения,
- фотошаблон.

Источники излучения УСЭ

Традиционным источником экспонирующего излучения в теневой литографии являются дуговые ртутные лампы высокого давления (HgArclamps), обеспечивающие излучение с длинами волн 436(g-line), 405(h-line), 365(i-line) нм, имеющие мощность в диапазоне 2-5 кВт. Необходимость охлаждения ртутных ламп, их ограждения на случай взрыва, высокое напряжение и ток питания - все это требует затрат и квалифицированного обслуживания.

Альтернативными источниками ультрафиолетового излучения являются ультрафиолетовые светодиодные (UVLED) источники. Они обеспечивают излучение в том же диапазоне длин волн 365 нм, 405 нм, 436 нм или их комбинацию. Работы в этом направлении ведущих производителей УСЭ – EVG [42,43], Suss [44,45] показали, что светодиодные источники не уступают ртутным лампам в обеспечении разрешения процесса, имея при этом больший срок службы, уменьшенное электропотребление, не требуя систем охлаждения и ограждения, не создают проблем с утилизацией отработанных источников. Это делает их доступными при создании специализированных установок [46,47,48,49].

Лазеры до недавнего времени редко применялись в теневой фотолитографии, поскольку оптические системы не обеспечивали приемлемый угловой спектр излучения. Современные системы микро-оптики позволяют регулировать угловой спектр и обеспечивают требуемую равномерность освещения рабочей области при использовании эксимерных [50], диодных [51] лазеров

Оптические системы УСЭ

Гомогенизация экспонирующего излучения (его высокая однородность), формирование коллимированного потока излучения с равномерным угловым спектром по всему полю маски, телецентричность потока и возможность его регулирования являются основными требованиями к оптическим системам.

Для придания этих свойств излучению от источника используются оптические интеграторы. Наряду с традиционными интеграторами Келера [52] разработан ряд новых систем [53], среди которых наиболее эффективными являются двойные интеграторы Келера, применяемые в системах микрооптики (MO Exposure Optics) серийного оборудования фирмы Suss [54-58]

Фотошаблоны являются неотъемлемой и важной частью систем теневой фотолитографии.

Именно они реализуют технологии повышения разрешения метода (коррекцию оптической близости, фазовый сдвиг. Характерной особенностью фотошаблонов в ближнем поле (в субволновом диапазоне) является способ размещения маскирующих элементов. В работе [59] выделены следующие варианты:

- выступающие металлические маскирующие элементы,
- металлические маскирующие элементы, внедренные в прозрачный материал основы (metal-embedded masks, MEM),
- профилированная рабочая поверхность с выступами и маскирующими элементами в углублениях (light-coupling masks, LCM).

Моделирование и экспериментальная оценка показали большую эффективность шаблонов с внедренными маскирующими элементами и размещенными в углубления профиля по сравнению с традиционными бинарными шаблонами в выступающими элементами.

В качестве материала основы фотошаблонов может использоваться боросиликатное стекло (borosilicateglass) [60], плавленный кварц (fusedsilica) [61,62], фторидкальция CaF₂, сапфир [63].

Традиционным маскирующим покрытием является хром со следующими параметрами:

- толщина 100нм ($\lambda > 248$ нм), 70 нм ($\lambda = 193$ нм),
- оптическая плотность - 3 для толщин 70-100 нм, допускается значение 2,5 для толщины 50 нм

Для гибкого ближнепольного контакта могут также использоваться фотошаблоны из кремния толщиной 2 мм, в которых методом осаждения из паровой фазы формируются мембраны толщиной 1 мкм. В качестве маскирующего покрытия используется NiCr толщиной 50 нм [64,65].

Заключение

Современная фотолитография с теневым экспонированием является универсальным и экономичным методом формирования микроструктур в широком диапазоне технологических областей.

Разработанные и хорошо освоенные в этой области способы экспонирования, методы повышения разрешающей способности процесса применимы в условиях как промышленного, так и опытного производства.

Исследования в области формирования оптического изображения в ближнем поле дали возможность получать структуры с субволновыми размерами на всем рабочем поле подложки в условиях исследовательских лабораторий, без применения экстремально дорогого оборудования проекционной литографии.

Методы с использованием оптических эффектов Гальбота, поверхностных плазмон-поляритонов доведены до практической реализации на серийных установках, обеспечивая разрешение в пределах 50-100нм.

Литература

1. Voelkel, R., Vogler, U., Bramati, A., Weichelt, T., Stuerzebecher, L., Zeitner, U. D., ... & Zoberbier, R. (2012, March). Advanced mask aligner lithography (AMALITH). In *Optical Microlithography XXV* (Vol. 8326, p. 83261Y). International Society for Optics and Photonics.
2. Everett, P. N., Delaney, W. F., & Griswold, M. P. (1991, July). Flexible And Rigid Masks And Alignment In Binary Optics. In *LEOS 1991 Summer Topical Meetings on Epitaxial Materials and In-Situ Processing for Optoelectronic Devices. Photonics and Optoelectronics* (pp. 19-20). IEEE.
3. Smith, H. I., Efremow, N., & Kelley, P. L. (1974). Photolithographic Contact Printing of 4000Å Linewidth Patterns. *Journal of The Electrochemical Society*, 121(11), 1503-1506.
4. Melngailis J, Smith, H. I., & Efremow N. (1975). Instrumentation for conformal photomask lithography. *IEEE Trans. Electron Devices*, 22 (7), 496-498.
5. Schmid, H., Biebuyck, H., Michel, B., & Martin, O. J. (1998). Light-coupling masks for lensless, sub-wavelength optical lithography. *Applied Physics Letters*, 72(19), 2379-2381.
6. Paulus, M., Michel, B., & Martin, O. J. (1999). Near-field distribution in light-coupling masks for contact lithography. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 17(6), 3314-331.
7. Rogers, J. A., Paul, K. E., Jackman, R. J., & Whitesides, G. M. (1997). Using an elastomeric phase mask for sub-100 nm photolithography in the optical near field. *Applied physics letters*, 70(20), 2658-2660.
8. Rogers, J. A., Paul, K. E., Jackman, R. J., & Whitesides, G. M. (1998). Generating ~ 90 nanometer features using near-field contact-mode photolithography with an elastomeric phase mask. *Journal*

- of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena, 16(1), 59-68.
9. Hesjedal, T., & Seidel, W. (2002). Near-field elastomeric mask photolithography fabrication of frequency surface acoustic wave transducers. *Nanotechnology*, 14(1), 91.
 10. Aizenberg, J., Rogers, J. A., Paul, K. E., & Whitesides, G. M. (1997). Imaging the irradiance distribution in the optical near field. *Applied physics letters*, 71(26), 3773-3775.
 11. Aizenberg, J., Rogers, J. A., Paul, K. E., & Whitesides, G. M. (1998). Imaging profiles of light intensity in the near field: applications to phase-shift photolithography. *Applied optics*, 37(11), 2145-2152.
 12. Paul, K. E., Zhu, C., Love, J. C., & Whitesides, G. M. (2001). Fabrication of mid-infrared frequency-selective surfaces by soft lithography. *Applied optics*, 40(25), 4557-4561.
 13. Maria, J., Jeon, S., & Rogers, J. A. (2004). Nanopatterning with conformable phase masks. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 166(1-3), 149-154.
 14. Li, Z. Y., Yin, Y., & Xia, Y. (2001). Optimization of elastomeric phase masks for near-field photolithography. *Applied Physics Letters*, 78(17), 2431-2433.
 15. Odom, T. W., Thalladi, V. R., Love, J. C., & Whitesides, G. M. (2002). Generation of 30– 50 nm structures using easily fabricated, composite PDMS masks. *Journal of the American Chemical Society*, 124(41), 12112-12113.
 16. Оптические основы контактной фотолитографии / Г. Н. Березин, А. В. Никитин, Р. А. Сурис. - М.: Радио и связь, 1982. - 103 с.: ил.; 20 см.
 17. Особенности дифракционного фокусирования в контактной фотолитографии с использованием коротковолнового ультрафиолетового излучения / Ю.Б. Цветков, И.Н. Рубцов, В.В. Ульянов, А.Н. Якименко // Электронная техника. Сер.2. – 1984. - Вып. 5(171). - С.6-12.
 18. Vladimirovsky, Y., Bourdillon, A., Vladimirovsky, O., Jiang, W., & Leonard, Q. (1999). Demagnification in proximity x-ray lithography and extensibility to 25 nm by optimizing Fresnel diffraction. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 32(22), L114–L118.
 19. Ren, K. J., Leonard, Q. J., Vladimirovsky, Y., Bourdillon, A. J. (2000). *Emerging Lithographic Technologies IV*.
 20. Bourdillon, A. J., & Boothroyd, C. B. (2001). Proximity correction simulations in ultra-high resolution x-ray lithography. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 34(22), 3209–3213.
 21. Danylyuk, S., Kim, H. S., Brose, S., Dittberner, C., Loosen, P., Taubner, T., ... & Juschkin, L. (2013). Diffraction-assisted extreme ultraviolet proximity lithography for fabrication of nanophotonic arrays. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 31(2), 021602.
 22. Seyd-Darwish, I., Taboury, J., & Chavel, P. (1993). Recording conditions of an array-illuminator hologram based on the Talbot effect. *Applied optics*, 32(35), 7135-7144.
 23. Yeh, W. H., Mansuripur, M., Fallahi, M., & Penner, R. S. (1999). Talbot imaging with increased spatial frequency: a technique for replicating truncated self-imaging objects. *Optics communications*, 170(4-6), 207-212.
 24. Suleski, T. J., Chuang, Y. C., Deguzman, P. C., & Barton, R. A. (2005, January). Fabrication of optical microstructures through fractional Talbot imaging. In *Micromachining Technology for Micro-Optics and Nano-Optics III* (Vol. 5720, pp. 86-93). International Society for Optics and Photonics.
 25. Isoyan, A., Jiang, F., Cheng, Y. C., Cerrina, F., Wachulak, P., Urbanski, L., ... & Marconi, M. (2009). Talbot lithography: self-imaging of complex structures. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 27(6), 2931-2937.
 26. Stuerzebecher, L., Harzendorf, T., Vogler, U., Zeitner, U. D., & Voelkel, R. (2010). Advanced mask aligner lithography: fabrication of periodic patterns using pinhole array mask and Talbot effect. *Optics express*, 18(19), 19485-19494.
 27. Solak, H. H., & Ekinci, Y. (2005). Achromatic spatial frequency multiplication: A method for production of nanometer-scale periodic structures. *Journal of Vacuum Science & Technology B:*

- Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 23(6), 2705-2710.
28. Solak, H. H., Dais, C., & Clube, F. (2011). Displacement Talbot lithography: a new method for high-resolution patterning of large areas. *Optics express*, 19(11), 10686-10691.
 29. Stuerzebecher, L., Fuchs, F., Harzendorf, T., & Zeitner, U. D. (2014). Pulse compression grating fabrication by diffractive proximity photolithography. *Optics letters*, 39(4), 1042-1045.
 30. Dunbar, L. A., Nguyen, D., Timotijevic, B., Vogler, U., Veseli, S., Bergonzi, G., ... & Stanley, R. P. (2014, March). Talbot lithography as an alternative for contact lithography for submicron features. In *Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics VII* (Vol. 8974, p. 89740F). International Society for Optics and Photonics.
 31. Chausse, P. J. P., Le Boulbar, E. D., Lis, S. D., & Shields, P. A. (2019). Understanding resolution limit of displacement Talbot lithography. *Optics express*, 27(5), 5918-5930.
 32. Levenson, M. D., Viswanathan, N. S., & Simpson, R. A. (1982). Improving resolution in photolithography with a phase-shifting mask. *IEEE Transactions on electron devices*, 29(12), 1828-1836.
 33. Pati, Y. C., & Kailath, T. (1994). Phase-shifting masks for microlithography: Automated design and mask requirements. *JOSA A*, 11(9), 2438-2452.
 34. Word, J., & Sakajiri, K. (2006, March). OPC to improve lithographic process window. In *Design and Process Integration for Microelectronic Manufacturing IV* (Vol. 6156, p. 61561I). International Society for Optics and Photonics.
 35. Bühling, S., Wyrowski, F., Kley, E. B., Nellissen, A. J. M., Wang, L., & Dirkwager, M. (2001). Resolution enhanced proximity printing by phase and amplitude modulating masks. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 11(5), 603.
 36. Cirino, G. A., Mansano, R. D., Verdonck, P., Cescato, L., & Neto, L. G. (2010). Diffractive phase-shift lithography photomask operating in proximity printing mode. *Optics express*, 18(16), 16387-16405.
 37. Stuerzebecher, L., Fuchs, F., Harzendorf, T., & Zeitner, U. D. (2014). Pulse compression grating fabrication by diffractive proximity photolithography. *Optics letters*, 39(4), 1042-1045.
 38. Srituravanich, W., Fang, N., Sun, C., Luo, Q., & Zhang, X. (2004). Plasmonic nanolithography. *Nano letters*, 4(6), 1085-1088.
 39. Liu, H., & Teng, J. (2013). Plasmonic nanolithography: towards next generation nanopatterning. *Journal of Molecular and Engineering Materials*, 1(01), 1250005.
 40. Baek, S., Kang, G., Kang, M., Lee, C. W., & Kim, K. (2016). Resolution enhancement using plasmonic metamask for wafer-scale photolithography in the far field. *Scientific reports*, 6, 30476.
 41. Kong, W., Luo, Y., Zhao, C., Liu, L., Gao, P., Pu, M., ... & Luo, X. (2019). Plasmonic Interference Lithography for Low-Cost Fabrication of Dense Lines with Sub-50 nm Half-Pitch. *ACS Applied Nano Materials*, 2(1), 489-496.
 42. EV Group develops first mask aligner with LED light source. (14 Aug 2006). URL: <https://www.ledsmagazine.com/company-newsfeed/article/16689689/ev-group-develops-first-mask-aligner-with-led-light-source>
 43. EVG: UV LED Exposure Technology. URL: <https://www.evgroup.com/technologies/optical-lithography/uv-led-technology/>
 44. Voelkel, R. (September 9th, 2010). Innovative Mask Aligner Lithography for MEMS and Packaging. *CEO SUSS MicroOptics SA, SEMICON Taiwan 2010*. URL: https://www.suss-microoptics.com/suss-microoptics/technical-publications/SUSS%20MicroOptics-Innovative_Mask_Aligner_Litho.pdf
 45. Schindler, K., Leischner, U., Lopper, C., Striebel, T., Kaiser, P., & Schoembs, U. (2017, October). High Intensity UV-LED Mask Aligner for Applications in Industrial Research. In *MikroSystemTechnik 2017; Congress* (pp. 1-4). VDE.
 46. Yapici, M. K., & Farhat, I. (2014, March). UV-LED exposure system for low-cost photolithography. In *Optical Microlithography XXVII* (Vol. 9052, p. 90521T). International Society for Optics and Photonics.
 47. LED masker : UV-KUB 2. URL: <https://www.kloe-france.com/en/laser-lithography/photolithography-systems/uv-exposure>.

48. Mask Aligner UV LED. URL:https://www.sps-europe.com/en/featured-items/uv-led-mask-aligner/56/?gclid=EAIaIQobChMI7Kz-396C5AIVh9CyCh3_ewp2EAAYAiAAEgLIIPD_BwE
49. Bernasconi, J., Scharf, T., Vogler, U., & Herzig, H. P. (2018). High-power modular LED-based illumination systems for mask-aligner lithography. *Optics express*, 26(9), 11503-11512
50. Partel, S., Zoppel, S., Hudek, P., Bich, A., Vogler, U., Hornung, M., & Voelkel, R. (2010). Contact and proximity lithography using 193 nm Excimer laser in Mask Aligner. *Microelectronic Engineering*, 87(5-8), 936-939.
51. Kirner, R., Vetter, A., Opalevs, D., Gilfert, C., Scholz, M., Leisching, P., ... & Voelkel, R. (2018). Mask-aligner lithography using a continuous-wave diode laser frequency-quadrupled to 193 nm. *Optics express*, 26(2), 730-743.
52. Weichelt, T., Bourgin, Y., & Zeitner, U. D. (2017). Mask aligner lithography using laser illumination for versatile pattern generation. *Optics express*, 25(18), 20983-20992.
53. Voelkel, R., Vogler, U., Bich, A., Pernet, P., Weible, K. J., Hornung, M., ... & Zeitner, U. D. (2010). Advanced mask aligner lithography: new illumination system. *Optics express*, 18(20), 20968-20978.
54. Vogler, U., Bich, A., Voelkel, R., Stuerzebecher, L., Zeitner, U., & Hornung, M. (2011, September). Mask aligner process enhancement by spatial filtering. In *Illumination Optics II* (Vol. 8170, p. 81700E). International Society for Optics and Photonics.
55. Voelkel, R., Vogler, U., Bramati, A., & Noell, W. (2015). Micro-optics and lithography simulation are key enabling technologies for shadow printing lithography in mask aligners. *Advanced Optical Technologies*, 4(1), 63-69.
56. Voelkel, R., Vogler, U., & Bramati, A. (2015, March). Advanced Mask Aligner Lithography (AMALITH). In *Optical Microlithography XXVIII* (Vol. 9426, p. 94261M). International Society for Optics and Photonics.
57. Dunbar, L. A., Bergonzi, G., Vogler, U., Angeloni, S., Kirner, R., Bramati, A., ... & Stanley, R. P. (2013, March). Advanced mask aligner lithography (AMALITH). In *Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics VI* (Vol. 8613, p. 86131D). International Society for Optics and Photonics.
58. Voelkel, R. (2014, March). Micro-optics: Enabling technology for illumination shaping in optical lithography. In *Optical Microlithography XXVII* (Vol. 9052, p. 90521U). International Society for Optics and Photonics.
59. Paulus, M., Schmid, H., Michel, B., & Martin, O. J. (2001). Contrast mechanisms in high-resolution contact lithography: A comparative study. *Microelectronic engineering*, 57, 109-116.
60. Güder, F., Yang, Y., Kruger, M., Stevens, G. B., & Zacharias, M. (2010). Atomic layer deposition on phase-shift lithography generated photoresist patterns for 1D nanochannel fabrication. *ACS applied materials & interfaces*, 2(12), 3473-3478
61. Wang, F., Weaver, K. E., Lakhtakia, A., & Horn, M. W. (2005). Electromagnetic modeling of near-field phase-shifting contact lithography with broadband ultraviolet illumination. *Optik*, 116(1), 1-9.
62. Fritze, M., Tyrrell, B. M., Astolfi, D. K., Lambert, R. D., Yost, D. R. W., Forte, A. R., ... & Wheeler, B. D. (2003). Subwavelength optical lithography with phase-shift photomasks. *Lincoln Laboratory Journal*, 14(2), 237-250.
63. White, J. C., Craighead, H. G., Howard, R. E., Jackel, L. D., Behringer, R. E., Epworth, R. W., ... & Sweeney, J. E. (1984). Submicron, vacuum ultraviolet contact lithography with an F2 excimer laser. *Applied Physics Letters*, 44(1), 22-24.
64. Blaikie, R. J., Alkaisi, M. M., McNab, S. J., Cumming, D. R. S., Cheung, R., & Hasko, D. G. (1999). Nanolithography using optical contact exposure in the evanescent near field. *Microelectronic Engineering*, 46(1-4), 85-88.
65. Alkaisi, M. M., Blaikie, R. J., McNab, S. J., Cheung, R., & Cumming, D. R. S. (1999). Sub-diffraction-limited patterning using evanescent near-field optical lithography. *Applied physics letters*, 75(22), 3560-3562.