

## ТЕХНОЛОГИИ

# Нано- импринтная литография.

# Материалы и технологии



Текст: Александр Скупов



Наноимпринтная литография (НИЛ) – один из наиболее перспективных альтернативных методов формирования наноструктур. В данной статье мы рассмотрим основные материалы и технологии, используемые при таком процессе наноструктурирования, и представим преимущества этого вида литографии относительно традиционных способов.

В настоящее время размеры наименьших элементов в интегральных микросхемах составляют несколько десятков нанометров. Создание столь малых структур стало возможным, благодаря разработке методов электронной и оптической литографии в глубоком ультрафиолете. Электронная литография используется для производства фотошаблонов, поскольку её производительность очень низка, а для группового производства микросхем – оптическая литография через ранее созданный шаблон. Во время проектирования топологии микросхем для литографии в глубоком ультрафиолете приходится применять сложные методы оптической коррекции (коррекция близости, сдвиг фаз проходящей волны). В результате фотошаблоны становятся дорогими и сложными.

Производительность наиболее совершенных установок оптической литографии на данный момент составляет свыше 100 пластин диаметром 300 мм в час. Такое оборудование имеет очень высокую стоимость. Например, установка для экспонирования на эксимерном лазере ArF, которая позволяет получить линии шириной 22 нм, может стоить несколько десятков миллионов долларов. Установки для оптической литографии следующего поколения (сверхглубокий ультрафиолет – Extreme UltraViolet – EUV) стоят ещё дороже. Стоимость литографического процесса достигает 30 % от всех производственных расходов при изготовлении прогрессивных современных микросхем.

Очевидно, что для создания в будущем более производительных и дешёвых микросхем требуется снижение стоимости литографического процесса. Одной из многообещающих технологий для микроэлектроники является наноимпринтная литография.

## Общая характеристика метода

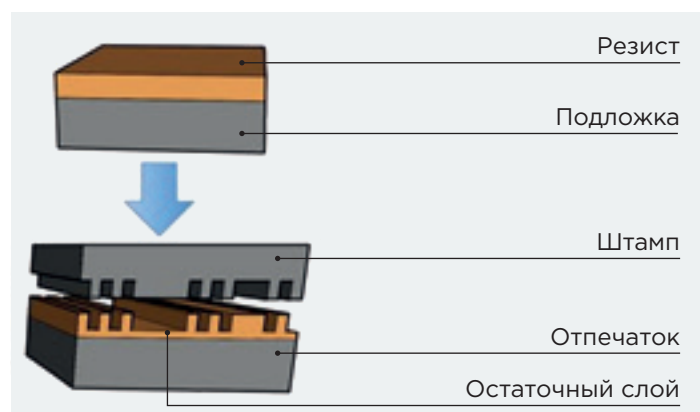
Термин «наноимпринтная литография» впервые появился в литературе в 90-е годы XX века. Ещё раньше были описаны те же самые по сути процессы, но под названием «горячее тиснение» (англ. Hot embossing)<sup>1</sup>. Общая идея НИЛ – прямое воздействие т. н. штампа на специальный резист для получения в нём рельефа для дальнейшего переноса на полупроводниковую пластину (рис. 1).

В отличие от других способов литографии в микроэлектронике НИЛ не требует сложных и дорогостоящих оптических или электронно-лучевых систем. С помощью прямого воздействия можно создавать элементы шириной в единицы нанометров<sup>2</sup>. Такое же разрешение пока возможно только с использованием электронной либо рентгеновской литографии на очень дорогостоящих инструментах. Кроме того, электронная литогра-

фия – это медленный процесс, а НИЛ позволяет формировать отпечатки от кристалла к кристаллу или сразу на всей поверхности пластины, т. е. это высокопроизводительный процесс, сравнимый по скорости с оптической литографией. Таким образом, главными преимуществами НИЛ являются низкая стоимость, простота, возможность достижения высокого разрешения (ширина элемента  $\leq 10$  нм) и высокая производительность.

Существуют два основных метода НИЛ: термическая и ультрафиолетовая (УФ). В первом методе штамп вдавливается в полимер, нагретый выше температуры стеклования, затем происходит его охлаждение и извлечение штампа. Во втором случае штамп из УФ прозрачного материала погружается в жидкий полимер, который отверждается под действием ультрафиолета, после чего происходит извлечение штампа.

Штамп для термической НИЛ обычно изготавливается из металла (например, никеля) или кремния. Для УФ НИЛ применяют кварц, полимеры (PDMS, силиконы). Для изготовления штампов используется электронная литография. Во многом этот процесс сходен с изготовлением фотошаблонов для оптической литографии. Отличием является только необходимость формирования глубокого (0,1–2 мкм) рельефа на поверхности подложки. На рынке есть ряд компаний, которые изготавливают такие штампы<sup>3</sup>. К штампу предъявляются повышенные требования по плоскопараллельности и бездефектности. В отличие от оптической литографии высокого разрешения, где на подложке формируется уменьшенное в несколько раз изображение фотошаблона, печать выполняется в масштабе 1:1. Это означает, что на штампе практически должны отсутствовать дефекты. Перед проведением процесса НИЛ штамп покрывается специальным антиадгезионным покрытием. Это позволяет избежать прилипания резиста к штампу при его отделении от подложки.



1 Общий принцип наноимпринтной литографии

<sup>1</sup> T. Nielsen, Nanoimprint lithography, Technical University of Denmark, 2003

<sup>2</sup> S.Y. Chou and co-authors, Nanoimprint Lithography, J. Vac. Sci. Technol. B 14(6), 1996

<sup>3</sup> <http://www.nilt.com/542/stamps,-molds,-masters,-templates-and-shims>

Как при термической, так и при УФ НИЛ при создании отпечатка очень сложно обеспечить полный контакт поверхности подложки и выступающей площади штампа. После печати неизбежно остаётся тонкий остаточный слой резиста, который удаляют с помощью плазменного травления. Эта операция во многом сходна с удалением остатков фоторезиста из очень узких проявленных областей.

К недостаткам способа относятся сложности совмещения штампа с уже существующей топологией на пластине (overlay), необходимость частой очистки штампа и нанесения антиадгезионного слоя, повышенные требования к качеству штампа.

Тем не менее, промышленными и научно-исследовательскими организациями ведётся непрерывная работа по преодолению этих недостатков. Наряду с улучшением оборудования разрабатываются и новые материалы, совершенствуются подходы к осуществлению процесса. Далее рассмотрим более подробно основные методы НИЛ.

## Термическая наноимпринтная литография

Технологический процесс термической НИЛ представлен на рис. 2. Он состоит из следующих этапов:

- нанесение резиста;
- нагрев и вдавливание штампа;
- охлаждение и отделение штампа;
- травление остаточного слоя

Для нанесения резиста в НИЛ в основном используется центрифугирование, иногда возможно использование спрея.

Нагрев штампа происходит до температуры, превышающей температуру стеклования резиста на 10 °С. Для получения высокой точности воспроизведения топологии при печати подложка и штамп должны быть нагреты до одинаковой температуры; распределение тепла по площади подложки и штампа – максимально однородным. Штамп вдавливается в резист под давлением 10-40 бар. Для однородности приложения давления верхняя и нижняя поверхности штампа должны быть параллельны, а при вдавливании необходимо использовать систему клиновой компенсации, не допускающей перекоса штампа.

На настоящий момент существуют коммерчески

Т 1

Материалы для термической наноимпринтной литографии производства Microresist Technology

РЕЗИСТ	ТОЛЩИНА СЛОЯ, НМ	ТЕМПЕРАТУРА СТЕКЛОВАНИЯ T <sub>g</sub> , °C	ТЕМПЕРАТУРА ВДАВЛИВАНИЯ ШТАМПА, °C	ДАВЛЕНИЕ ПРИЖИМА ШТАМПА, БАР	ТЕМПЕРАТУРА ОТДЕЛЕНИЯ ШТАМПА
mr-I 7000R	100-300	55	120-140	20-40	30-50
mr-I 8000R	100-300	105	150-180	20-40	80-100
mr-I 9000M	100-1000	35	90-140	20-40	90-140
mr-I T-85	300-5000	85	130-150	5-20	60-80
SIPOL	60-200	63	120		30-50

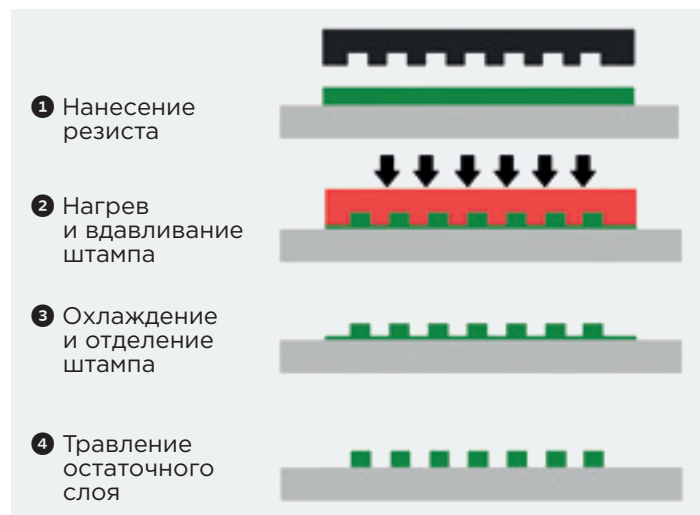
<sup>4</sup> Microresist Technologies, mr-I 7000 and 8000, Product data

<sup>5</sup> Microresist Technologies, mr-I 9000M, Product data

доступные материалы для термической НИЛ. В качестве примера рассмотрим продукты фирмы Microresist Technology. Основные свойства этих материалов представлены в Т 1.

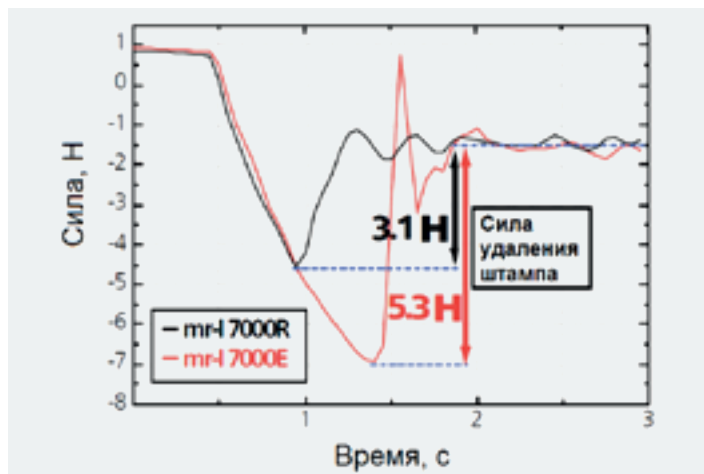
Материалы mr-I 7000, 8000 и 9000 являются импринтными резистами общего назначения. Они обладают высокой текучестью выше температуры стеклования, что позволяет им быстро растекаться по площади штампа, и образуют тонкий остаточный слой, который легко удаляется в плазме кислорода. Также данные материалы обладают высокой устойчивостью к фтор- и хлорсодержащей плазме, что позволяет проводить дальнейшие процессы формирования наноструктур (травление Si, GaAs, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и проч.). Резисты mr-I 7000 и 8000 содержат специальные фторсодержащие присадки, существенно снижающие силу извлечения штампа и предотвращающие прилипание резиста (рис. 3)<sup>4</sup>. Резисты серии mr-I 9000 сшиваются при нагреве, поэтому при дальнейшей обработке сохраняют форму рельефа вплоть до 250 °С<sup>5</sup>.

Резисты серии mr-I T-85 были разработаны для использования в качестве постоянных слоёв в устройствах микрофлюидики и микрооптики. Этот материал после печати становится стойким к воздействию кислот и органических растворителей<sup>6</sup>.



2

Процесс термической наноимпринтной литографии

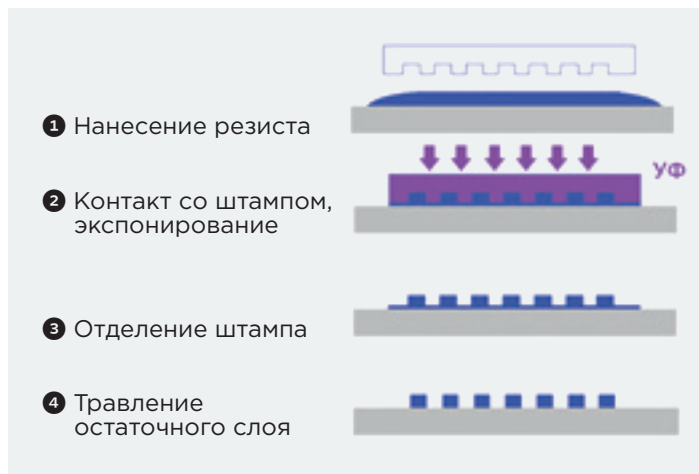


3 Снижение силы извлечения штампа после модификации резистов mr-I 7000 (Microresist Technologies) фторсодержащей присадкой

Резист SIPOL был разработан для применений, где требуется высокая устойчивость при плазменном травлении, например при формировании рельефа в пластинах сапфира перед эпитаксией слоёв для светодиодов высокой яркости (patterned sapphire structures – PSS)<sup>7</sup>. Для достижения столь высокой устойчивости к плазме, в состав материала включены кремний-органические соединения. Это вызывает сложности при снятии такого резиста, поэтому для переноса изображения в подложку рекомендуется использовать промежуточный слой.

### Ультрафиолетовая наноимпринтная литография

Технологический процесс НИЛ с использованием УФ отверждаемых полимеров отличается от вышеописанного отсутствием процессов нагрева-охлаждения, а также специфическим оборудованием для печати (рис. 4). Здесь вместо прессы с нагревом используется пресс с источником УФ-излучения и прозрачный штамп. Усилия вдавливания штампа УФ НИЛ намного ниже, чем в термической НИЛ. Для проведения процесса может применяться обычная установка контактной литографии в режиме жёсткого контакта маски и подложки, снабжённая



4 Процесс УФ наноимпринтной литографии

специальной оснасткой. В таком случае все требования к равномерности приложения давления и засветки удовлетворяются автоматически при наличии качественного штампа и откалиброванной УФ-лампы.

Как и в случае термической НИЛ рассмотрим в качестве примера продукты фирмы Microresist Technology (1-2).

Резист mr-NIL210 разработан для решения задач, где требуется высокая устойчивость к плазменному травлению. При травлении сапфира он демонстрирует меньшую скорость травления по сравнению с часто используемым для этих целей фоторезистом Microposit SPR 955<sup>8</sup>. Пример использования mr-NIL210 представлен на рис. 5.

Главная особенность mr-UVCur21 – высокая чувствительность к УФ, что позволяет увеличивать производительность<sup>9</sup>. mr-UVCur21 имеет в своём составе фторированный полимер, что уменьшает адгезию штампа и позволяет увеличить количество бездефектных отпечатков до очистки штампа<sup>10</sup>.

Резист mr-UVCur26SF не содержит растворителя, обладает низкой вязкостью (15 мПа\*с), что позволяет наносить его на подложку различными методами: центрифугированием, дозированием или струйной печатью (рис. 6). Этот материал был разработан для НИЛ на подложках большого размера.

Т 2

Материалы для ультрафиолетовой наноимпринтной литографии производства Microresist Technology

РЕЗИСТ	ТОЛЩИНА, НМ	ДАВЛЕНИЕ ПРИ ПЕЧАТИ, БАР	ДЛИНА ВОЛНЫ ЭКСПОНИРОВАНИЯ, НМ	ДОЗА ЭКСПОНИРОВАНИЯ, МДЖ/СМ <sup>2</sup>
mr-NIL210	100-500	>0,1	320-420	1000
mr-UVCur21	100-1600	>0,1	320-420	?
mr-XNIL26	100-4800	0,1-10	320-420	>220
mr-UVCur26SF		>0,1	320-420	>500

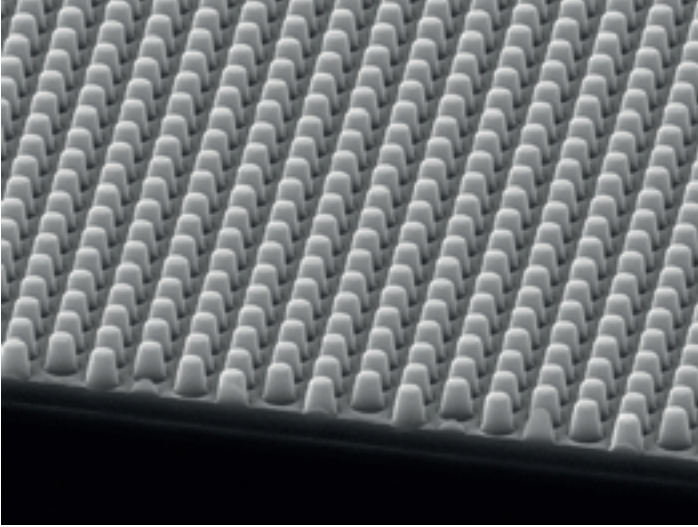
<sup>6</sup> Microresist Technologies, mr-I T-85, Product data

<sup>7</sup> Microresist Technologies, SIPOL, Product data

<sup>8</sup> Microresist Technologies, mr-NIL210, Product data

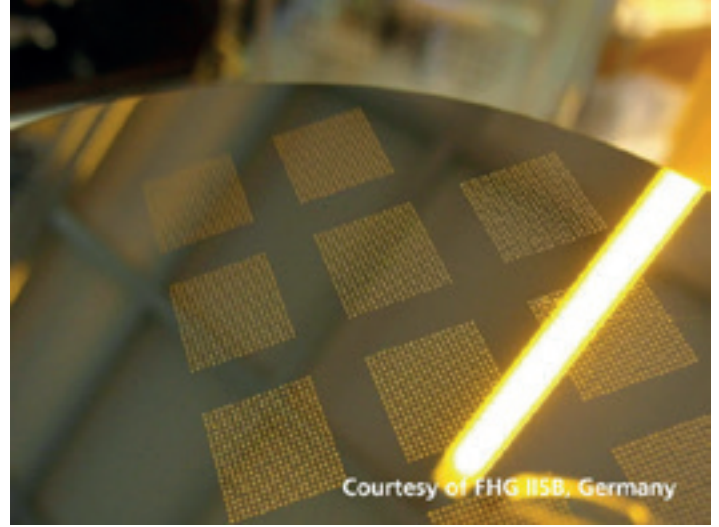
<sup>9</sup> Microresist Technologies, UVCur21, Product data

<sup>10</sup> Microresist Technologies, mr-UVCur26SF, Product data



5

Столбики диаметром 100 нм, сформированные в резисте mr-NIL210 производства Microresit Technologies



6

Квадраты, полученные с помощью струйной печати резистом mr-UVCur26SF (Microresit Technologies), предназначенные для дальнейшей НИЛ на степпере

## Заключение

Долгое время единственным методом массового производства низкоразмерных структур являлась оптическая литография. Но с уменьшением размеров этих структур до десятков нанометров оборудование для литографии стало очень сложным и, как следствие, дорогим. Одним из альтернативных методов по отношению к оптической литографии стала наноимпринтная. Существуют два основных метода такого технологического процесса: термическая НИЛ и УФ НИЛ. Для каждого из них применяется своё специфическое оборудование и материалы.

Преимущества наноимпринтной литографии:


- низкая стоимость оборудования;
- простота процесса;
- возможность достижения низких топологических норм (менее 30 нм);
- высокая производительность.

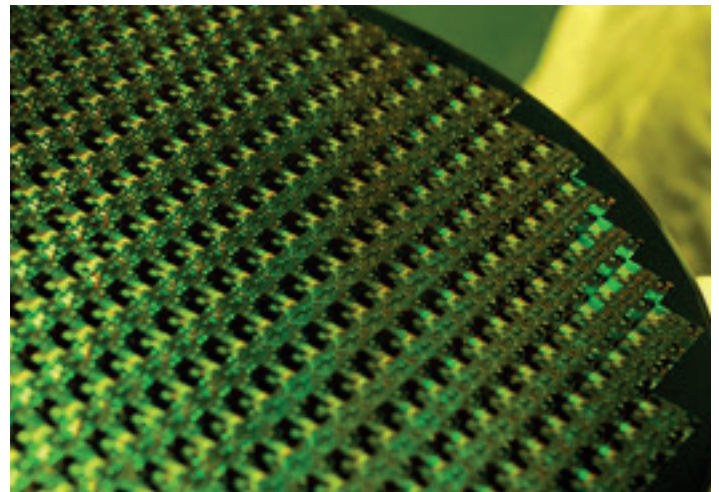
Недостатки наноимпринтной литографии:

- сложность совмещения штампа с нижележащим слоем;
- высокие требования, предъявляемые к качеству штампа;
- необходимость частого обслуживания штампа.

Перечисленные недостатки в настоящий момент решаются ведущими научно-исследовательскими и промышленными организациями, уже была продемонстрирована возможность промышленного применения НИЛ. На рис. 7 представлена фотография пластины, топология на которой была сформирована с помощью пошаговой НИЛ каждого кристалла.

Большой потенциал НИЛ подтверждается также активной разработкой коммерческих материалов для данного процесса. Одним из лидеров в их создании является компания Microresit Technologies, продукты которой были рассмотрены в данной статье.

Группа компаний Остек тесно взаимодействует с производителями оборудования и материалов для описанного процесса. При необходимости специалисты компании могут оказать технологическую поддержку при освоении нового для отечественных предприятий процесса НИЛ, совместно с производителями материалов и оборудования провести исследования и тесты. 



7

Фрагмент пластины диаметром 200 мм с топологией, полученной методом наноимпринтной литографии