

НАНОИМПРИНТНАЯ ЛИТОГРАФИЯ: МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

А.Скупов¹

УДК 621.382
ВАК 05.27.06

Долгое время единственным методом массового производства низкоразмерных структур была оптическая литография. Но с уменьшением размеров этих структур до десятков нанометров оборудование для литографии стало очень сложным и, как следствие, дорогостоящим. Один из перспективных альтернативных методов формирования наноструктур – наноимпринтная литография (НИЛ). Об особенностях и преимуществах этого метода рассказывается в статье.

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, имеющая очень низкую производительность, используется для производства фотошаблонов, а оптическая литография – для группового производства микросхем на основе созданного шаблона. Во время проектирования топологии микросхем для литографии в глубоком ультрафиолете приходится применять сложные методы оптической коррекции (например, корректировать эффект оптической близости или сдвиг фаз проходящей волны). В результате фотошаблоны получаются дорогостоящими и сложными.

На данный момент наиболее совершенные установки оптической литографии способны производить за один час более 100 пластин диаметром 300 мм. Такое оборудование имеет очень высокую стоимость. Например, установка для экспонирования на эксимерном лазере ArF, которая позволяет получить линии шириной 22 нм, обходится в несколько десятков миллионов

долларов. Установки для оптической литографии следующего поколения (с применением сверхглубокого ультрафиолета – Extreme UltraViolet, EUV) – еще дороже. Стоимость литографического процесса при изготовлении современных микросхем достигает 30% всех производственных расходов.

Очевидно, что для создания в будущем более производительных и дешевых микросхем требуется снижение стоимости литографического процесса. Одна из многообещающих технологий для микроэлектроники – наноимпринтная литография.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДА

Термин "наноимпринтная литография" впервые появился в литературе в 90-е годы 20 века. Еще раньше были описаны практически те же процессы, но под названием "горячее тиснение" (от англ. – Hot embossing) [1]. Общая идея НИЛ – прямое воздействие так называемого штампа на специальный резист для получения в нем рельефа для последующего 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, исчисляемой единицами нанометров [2]. Такое же

¹ ООО "Остек-Интегра", главный специалист отдела технического сопровождения, skupov.a@ostec-group.ru.

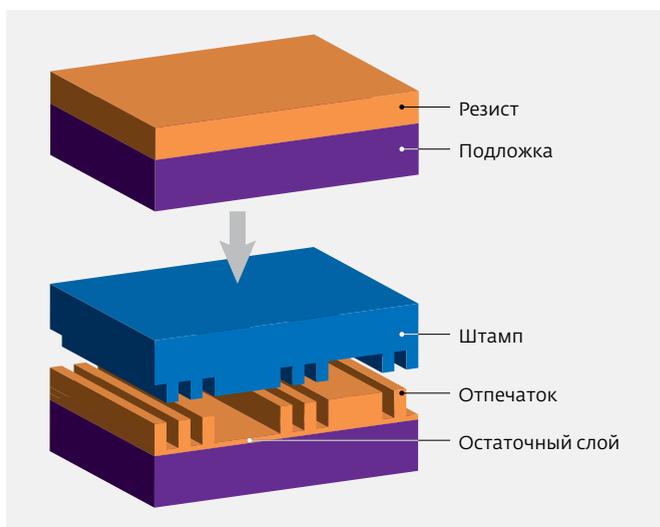


Рис.1. Общий принцип наноимпринтной литографии

разрешение пока возможно только с использованием электронной либо рентгеновской литографии на очень дорогостоящем оборудовании. Кроме того, электронная литография – медленный процесс, а НИЛ позволяет формировать отпечатки от кристалла к кристаллу или сразу на всей поверхности пластины. Иными словами, это высокопроизводительный процесс, сравнимый по скорости с оптической литографией. Таким образом, основные преимущества НИЛ – низкая стоимость, простота, возможность достижения большого разрешения (ширина элемента ≤ 10 нм) и высокая производительность.

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

Штамп для термической НИЛ обычно изготавливается из металла (например, никеля) или кремния. Для УФ НИЛ применяют кварц, полимеры (ПДМС, силиконы). Для изготовления штампов используется электронная литография. Во многом этот процесс сходен с изготовлением фотошаблонов для оптической литографии. Различие состоит только в необходимости формирования глубокого (0,1–2 мкм) рельефа на поверхности подложки. Ряд компаний на рынке изготавливают такие штампы [3]. 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 про-

цесса НИЛ на штамп наносится специальное антиадгезионное покрытие, что позволяет избежать прилипания резиста к штампу при его отделении от подложки.

Как при термической, так и при УФ НИЛ в процессе получения отпечатка очень сложно обеспечить полный контакт поверхности подложки и выступающей площади штампа. После печати неизбежно остается тонкий 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 на пластине топологией (overlay), необходимость частой очистки штампа и нанесения антиадгезионного слоя, повышенные требования к качеству штампа.

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

ТЕРМИЧЕСКАЯ НАНОИМПРИНТНАЯ ЛИТОГРАФИЯ

Технологический процесс термической НИЛ состоит из следующих этапов (рис.2):

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

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

Нагрев штампа происходит до температуры, превышающей температуру стеклования резиста на 10 °С.

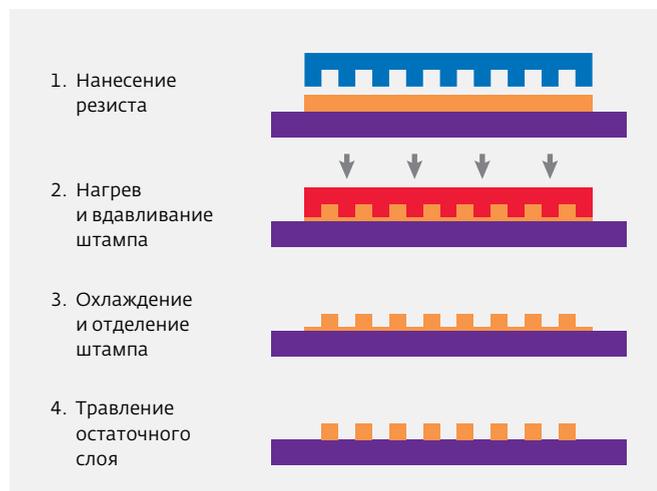


Рис.2. Процесс термической наноимпринтной литографии

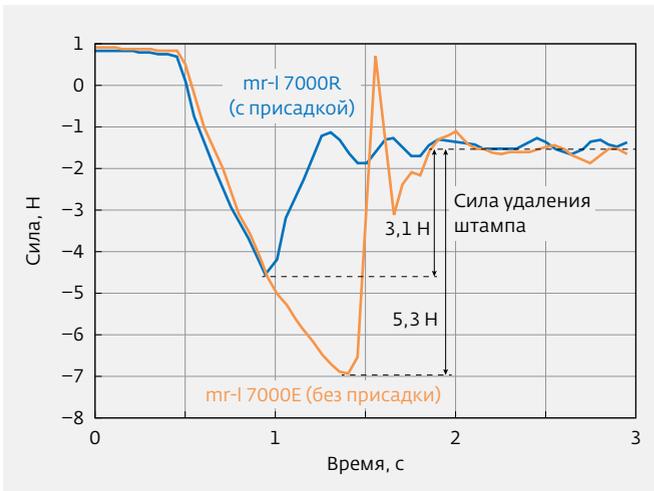


Рис.3. Снижение силы извлечения штампа после модификации резистов mr-I 7000 (micro resist technology GmbH) фторсодержащей присадкой. Знаки чисел по вертикальной оси соответствуют направлению действия силы (положительные числа – прижатие, отрицательные – удаление штампа)

Для получения высокой точности воспроизведения топологии при печати подложка и штамп должны быть нагреты до одинаковой температуры. Распределение тепла по площади подложки и штампа должно быть максимально однородным. Штамп вдавливаются в резист под давлением 10–40 бар. Для однородности приложения давления верхняя и нижняя поверхности штампа должны быть параллельны, при вдавливании необходимо использовать систему клиновой компенсации, не допускающей перекоса штампа.

В настоящее время коммерчески доступны материалы для термической НИЛ. В качестве примера рассмотрим продукты фирмы micro resist technology (табл.1).

Таблица 1. Материалы для термической наноимпринтной литографии компании micro resist technology

| Резист | Толщина слоя, нм | Температура стеклования, °C | Температура вдавливания штампа, °C | Давление прижима штампа, бар | Температура отделения штампа, °C |
|------------|------------------|-----------------------------|------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 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 | 10–30 | 20–50 |

Материалы mr-I 7000, 8000 и 9000 – импринтные резисты общего назначения – обладают высокой текучестью при температурах выше температуры стеклования. Благодаря этому они быстро растекаются по площади штампа и образуют тонкий остаточный слой, который легко удаляется в плазме кислорода. Кроме того, материалы обладают высокой устойчивостью к фтор- и хлорсодержащей плазме, что дает возможность проводить дальнейшие процессы формирования наноструктур (травление Si, GaAs, Al₂O₃ и т.д.). Резисты mr-I 7000 и 8000 содержат специальные фторсодержащие присадки, которые существенно снижают силу извлечения штампа и предотвращают прилипание резиста (рис.3) [4]. Резисты серии mr-I 9000 сшиваются при нагреве, поэтому при дальнейшей обработке сохраняют форму рельефа вплоть до 250 °C [5].

Резисты серии mr-I T-85 были разработаны для использования в качестве постоянных слоев в устройствах микрофлюидики и микрооптики. Этот материал после печати становится стойким к воздействию кислот и органических растворителей [6].

Резист SIPOL предназначен для применений, где требуется высокая устойчивость при плазменном травлении, например при формировании рельефа в пластинах сапфира перед эпитаксией слоев для светодиодов высокой яркости (patterned sapphire structures, PSS) [7]. 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 на подложку рекомендуется использовать промежуточный слой.

УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ НАНОИМПРИНТНАЯ ЛИТОГРАФИЯ

Технологический процесс НИЛ с использованием УФ-отверждаемых полимеров отличается от вышеописан-

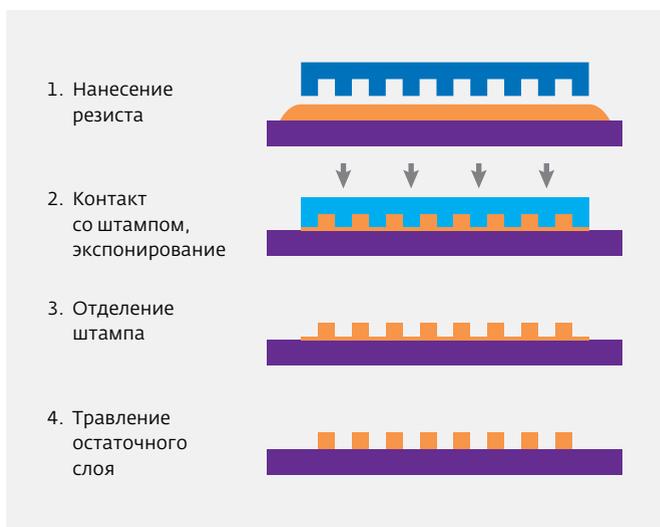


Рис.4. Процесс УФ наноимпринтной литографии

ного отсутствием процессов нагрева-охлаждения, а также специфическим оборудованием для печати (рис.4). Вместо прессы с нагревом используются пресс с источником УФ-излучения и прозрачный штамп. Усилия вдавливания штампа в УФ НИЛ намного ниже, чем в термической НИЛ. Можно применять обычную установку контактной литографии, снабженную специальной оснасткой, в режиме жесткого контакта маски и подложки. В таком случае требования к равномерности приложения давления и засветки удовлетворяются автоматически при наличии качественного штампа и откалиброванной УФ-лампы.

Как и в случае с термической НИЛ, рассмотрим в качестве примера продукты фирмы micro resist technology (табл.2).

Резист mr-NIL210 разработан для решения задач, где требуется высокая устойчивость к плазменному травлению. При травлении сапфира наблюдается меньшая скорость травления по сравнению с часто применяемым для

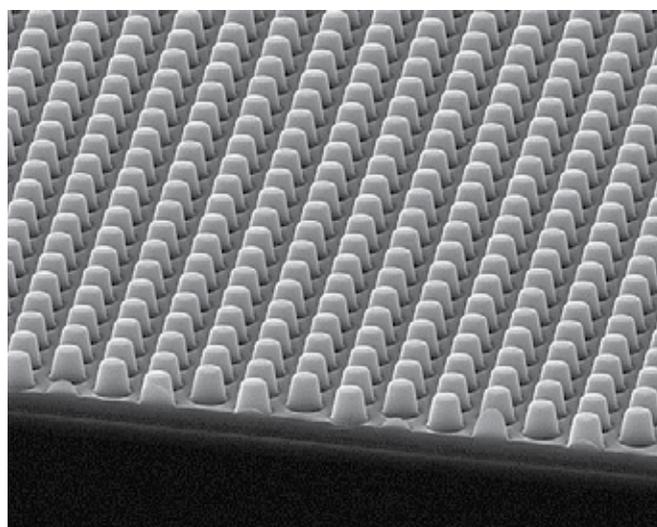


Рис.5. Столбики диаметром 100 нм, сформированные в резисте mr-NIL210 производства micro resist technology GmbH

этих целей фоторезистом Microposit SPR955 [8]. Пример использования mr-NIL210 представлен на рис.5.

Главная особенность mr-UVCur21 – высокая чувствительность к УФ, что позволяет увеличивать производительность [9]. В состав резиста mr-UVCur21 входит фторированный полимер, что уменьшает адгезию штампа и позволяет увеличить количество бездефектных отпечатков до очистки штампа.

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

В заключение отметим, что уже была продемонстрирована возможность промышленного применения НИЛ. На рис.7 представлена фотография пластины, топология

Таблица 2. Материалы для ультрафиолетовой наноимпринтной литографии компании micro resist technology

| Резист | Толщина, нм | Давление при печати, бар | Длина волны экспонирования, нм | Доза экспонирования, мДж/см ² |
|--------------|-------------|--------------------------|--------------------------------|--|
| mr-NIL210 | 100-500 | >0,1 | 320-420 | 1000 |
| mr-UVCur21 | 100-1600 | >0,1 | 320-420 | >700 |
| mr-XNIL26 | 100-4800 | 0,1-10 | 320-420 | >220 |
| mr-UVCur26SF | 100-2000 | >0,1 | 320-420 | >500 |

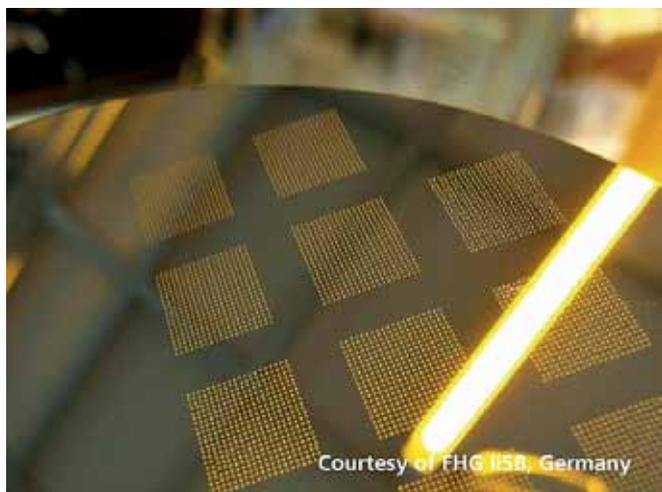


Рис.6. Квадраты, полученные с помощью струйной печати резистом mr-UVCur26SF (micro resist technology GmbH), предназначенные для последующей НИЛ на степпере

на которой была сформирована с помощью пошаговой НИЛ каждого кристалла.

Большой потенциал НИЛ подтверждается активной разработкой коммерческих материалов для данного процесса. Один из лидеров в этой сфере – компания micro resist technology, продукты которой рассмотрены в данной статье.

Группа компаний Остек активно взаимодействует с производителями оборудования и материалов для описанного процесса. При необходимости специалисты могут оказать технологическую поддержку в ходе освоения нового для отечественных предприятий процесса

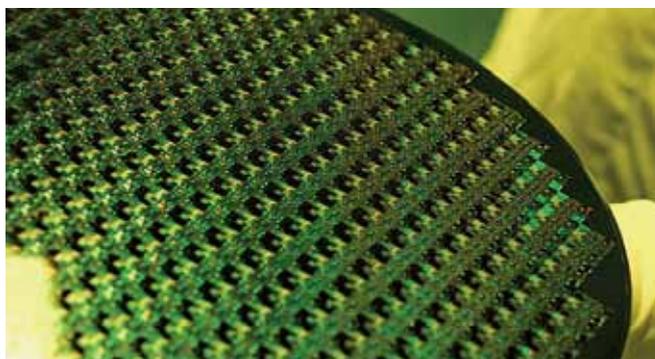


Рис.7. Фрагмент пластины диаметром 200 мм с топологией, полученной методом наноимпинтной литографии

НИЛ, совместно с производителями материалов и оборудования провести исследования и тесты.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Nielsen T.** Nanoimprint lithography, Technical University of Denmark, 2003.
2. **Chou S.Y., Krauss P.R., Renstrom P.J.** Nanoimprint Lithography // J. Vac. Sci. Technol. B. 1996. Vol. 14. № 6. P. 4129–4133.
3. <http://www.nilt.com/542/stamps,-molds,-masters,-templates-and-shims>
4. micro resist technology, mr-I 7000 and 8000, Product data.
5. micro resist technology, mr-I 9000M, Product data.
6. micro resist technology, mr-I T-85, Product data.
7. micro resist technology, SIPOL, Product data.
8. micro resist technology, mr-NIL210, Product data.
9. micro resist technology, UVCur21 series, Product data.

НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



**МУЛЬТИАРХИТЕКТУРНЫЕ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СУПЕРСИСТЕМЫ.
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**
Митропольский Ю.И.

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 146 с.
ISBN 978-5-94836-463-6

Цена 370 руб.

Настоящая работа посвящена исследованиям по мультиархитектурным вычислительным суперсистемам, анализу и перспективам их развития. Исследования, начатые в начале 90-х годов, явились продолжением работ по системе "Электроника СС БИС". Предложены этапы для реализации проекта. Исследования проводились в рамках проектов ОНИТ РАН.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ (495) 234-0110; 📠 (495) 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru