



КОНТАКТНАЯ ЛИТОГРАФИЯ В НАНОТЕХНОЛОГИИ

В.Бокарёв, Е.Горнев
valbokarev@mail.ru

С переходом микроэлектроники к нанометровым проектным нормам перенос изображения претерпевает существенные изменения и непрерывно совершенствуется.

При изготовлении интегральных схем (ИС) с микронными проектными нормами превалировали установки для контактной печати, однако по мере уменьшения размеров возросшие требования к фотолитографическому оборудованию привели к их вытеснению из технологического цикла. Основные причины – сложность изготовления фотошаблонов для контактной печати с субмикронными размерами элементов и непродолжительный период их эксплуатации (использование фотошаблона, как правило, не превышает 50 процессов переноса изображения), причем его сохранность не гарантируется даже после первого переноса изображения.

При проекционной фотолитографии отсутствует прямой контакт фотошаблона с рабочей пластиной, что обеспечивает существенное увеличение времени его жизни; для переноса субмикронных размеров используются шаблоны с минимальными микронными размерами, что обеспечивает сокращение затрат на их изготовление и способствует повышению качества воспроизведения рисунка, так как в этом случае изображение на фотошаблоне в 4–10 раз больше передаваемого на рабочую пластину. Для передачи изображения уровня 0,5 мкм достаточно изготовить фотошаблон с минимальными размерами элементов 2 мкм. Это существенно упрощает изготовление фотошаблонов с заданными допусками на неровность края и линейность размеров.

Оба рассматриваемых фактора обеспечивают экономи-

ческую целесообразность изготовления современных изделий микроэлектроники с использованием установок проекционной печати. Однако стоимость современных степперов и сканеров для этих целей на порядки выше, чем оборудования для контактной печати, причем с переходом на установки с источниками экстремального УФ-излучения составляет сотни миллионов долларов. Разрешение установок для проекционной печати ограничено длиной волны применяемого для экспонирования фоторезиста источника излучения, поэтому при использовании установок с эксимерными источниками излучения для переноса изображения уровня 0,1 мкм и менее приходится вводить в шаблоны дополнительные элементы, корректирующие эффекты близости, что дополнительно удорожает изготовление фотошаблонов.

Несмотря на сравнительную простоту изготовления фотошаблонов с субмикронными нормами для проекционной литографии, контактная литография имеет свои преимущества. В частности, при ее использовании [1–2] фотошаблон находится в прямом контакте с пластиной с нанесенным фоторезистом, поэтому в тонких слоях последнего при полном контакте шаблона и подложки можно достичь уровня разрешения, определяемого минимальными размерами на шаблоне [2].

Поверхности рабочих пластин и шаблона не являются абсолютно плоскими. Между ними существуют зазоры различной величины, которые при сопоставимости размеров пере-

носимого изображения и длины волны источника излучения приводят к искажению размера и формы субмикронных элементов из-за расходимости светового пучка в месте зазора и дифракционных эффектов на краях области геометрической тени от фотомаски. По этой причине минимальный переносимый размер ограничивается недостаточной плоскостностью рабочих поверхностей шаблона, пластины и слоя фоторезиста. Применение при контактной печати оптически прозрачных для используемой длины волны подложек приводит к проникновению излучения под маскирующую поверхность и изменению размеров переносимых элементов. Кроме того, наличие неорганических пылинок на пластине или шаблоне не только создает локальные зазоры, но и ведет к повреждению поверхности шаблона при его соприкосновении с пластиной.

В отсутствие контакта между шаблоном и пластиной в локальных областях из-за неплоскостности либо наличия загрязнений перенос изображения осуществляется в дифракционной области Френеля [2], разрешение W в которой определяется формулой:

$$W \cong \sqrt{0,7\lambda h} ,$$

где λ – длина волны экспонирующего излучения, обычно равная 365 нм, а h – максимальная высота зазора между шаблоном и пластиной.

Из формулы следует, что для получения разрешения на уровне 0,5 мкм по всей поверхности экспонируемой пластины ло-



кальные зазоры между рабочими поверхностями шаблона и пластины со слоем фоторезиста не должны превышать 1 мкм.

При искажениях геометрии исходного рисунка и вызываемых дифракционными эффектами отклонениях размеров элементов необходимо их подавление, причем для проекционной литографии также способы давно разработаны. Вместе с тем, их применение в контактной литографии связано с решением ряда проблем.

Для уменьшения искажений предложено использовать стеклянные гибкие фотошаблоны [3] с толщиной стекла, не превышающей 0,2 мм. Их применение позволяет гарантированно переносить изображение уровня 0,4 мкм. Однако изготовление и эксплуатация таких фотошаблонов крайне затруднены из-за их пониженной стойкости к механическим воздействиям.

Разрешающую способность фотолитографии можно повысить при использовании антиотражающих покрытий (ARC – Anti Reflective Coating), что важно при переносе субмикронного изображения на подложки с высоким коэффициентом отражения или при использовании прозрачных подложек. Отражение света от большинства поверхностей вызывает фазовый сдвиг волны на 180°, что приводит к минимуму интенсивности излучения на поверхности раздела фоторезист–подложка. В результате на подложке может оставаться не удаляемый при проявлении тончайший слой слабо экспонированного фоторезиста, для удаления которого приходится прибегать к существенному переэкспонированию.

При когерентном источнике излучения интерференция падающей и отраженной волн приводит к появлению в слое фоторезиста стоячих волн, вызывающих значительное изменение дозы экспонирования в зависимости от толщины пленки. Минимизировать этот эффект можно постэкспозиционной сушкой фоторезистивного

слоя либо при использовании антиотражающих покрытий.

Из формулы следует, что наиболее просто разрешающую способность фотолитографических установок улучшить, уменьшая длину волны излучения. По этому пути идет развитие оборудования для проекционной печати.

Источники УФ-излучения на основе короткодуговых ртутно-ксеноновых ламп обеспечивают экспонирование фоторезиста на длине волн до 225 нм, а эксимерные лазеры – до 157 нм. Вместе с тем применение источников дальнего УФ требует замены стеклянных фотошаблонов на кварцевые, причем в ряде случаев приходится применять оптику и шаблоны из фторидов щелочно-земельных металлов.

Использование источников излучения с длиной волны 100 нм привело к применению отражательных оптических систем, так как материалы, прозрачные в данном спектральном диапазоне, отсутствуют.

Дополнительный метод увеличения разрешающей способности проекционной фотолитографии – применение иммерсионных жидкостей для заполнения зазора между объективом и пластиной с нанесенным фоторезистом. Иммерсионную литографию можно отнести к наиболее простым методам увеличения разрешающей способности оборудования без уменьшения длины волны источника излучения. Ее применение позволило существенно увеличить разрешающую способность сканеров для проекционной печати, работающих на ртутных источниках с длиной волны 364 нм и на эксимерных лазерах с длиной волны 193 нм [4].

Сущность метода состоит в заполнении пространства между объективом установки и рабочей пластиной жидкостью с показателем преломления, существенно большим, чем воздуха. Для усиления эффекта объектив установки изготавливают из оптических материалов с высоким показателем преломления, например, из лютеций-алюминиевого граната или сапфира.

Длина волны излучения, распространяющегося в среде, зависит от показателя ее преломления. Тогда заполнение пространства между объективом и фоторезистом иммерсионной средой с показателем преломления n уменьшает длину волны активничного (фотохимического) излучения в n раз. Применение оптических материалов, фоторезистов и иммерсионных жидкостей с показателями преломления более 1,93 позволяет с использованием 193-нм иммерсионного сканера переносить критические размеры уровня 25 нм [4]. Фирмы ASML, Canon и Nikon уже предлагают такие сканеры для производства ИС с 45-нм проектными нормами, однако для широкого внедрения иммерсионной фотолитографии в технологию необходимо решить ряд серьезных проблем. Основная из них – подбор иммерсионной жидкости, поскольку активничное излучение с длиной волны до 193 нм сильно поглощается жидкими средами, вызывая в них во многих случаях химические реакции с выделением газов и изменением оптических свойств жидкости. Жидкости с наибольшим показателем преломления, как правило, токсичны и химически агрессивны. Многие из них взаимодействуют с металлическими конструкциями степперов, с оптикой, фоторезистом и с рабочей пластиной. По этим причинам использование большинства высокопреломляющих жидкостей в иммерсионной литографии невозможно. Даже применение обыкновенной воды с $n=1,44$ (при $\lambda=193$ нм) при использовании 193-нм сканеров приводит к выделению газа, так как такое излучение инициирует фотохимическую реакцию.

За рубежом ведется активный поиск и разработка иммерсионных жидкостей для длины волн менее 193 нм. Возможно, в ближайшее десятилетие технологические задачи микроэлектроники в области переноса изображения уровня до 25 нм будут решены с использованием Ar-F либо F₂ им-

мерсионных сканеров без привлечения EUV-литографии (на источниках экстремального УФ-излучения).

Установки проекционной фотолитографии разрабатываются для работы с кремниевыми пластинами диаметром от 200 мм, однако для изготовления СВЧ-изделий на поверхностных акустических волнах и некоторых других используются монокристаллы кварца, лангсита, ниобата и танталата лития, ЦТС, полупроводниковые кристаллы групп A_3B_5 и A_2B_6 . Монокристаллические пластины всех этих материалов, как правило, имеют диаметр не превышающий 100 мм. Поэтому применение установок, рассчитанных на пластины диаметром 200 мм и более, в этих случаях экономически неоправданно. Увеличение рабочих частот изделий на основе таких кристаллов напрямую связано с уменьшением топологических размеров.

При изготовлении таких изделий в основном применяется оборудование для контактной печати, предельное разрешение которого не превосходит 0,1 мкм. Вместе с тем стоимость изготовления рабочих шаблонов с такими топологи-

Некоторые свойства мягких и жестких штампов

	Жесткий штамп	Мягкий штамп
Материал	SiO ₂	PDMS (полидиметилсилоксан)
Разрешение	≤10 нм	≤ 50 нм
Предельный размер	≤26 x 33 мм	≤ размера пластины
Стоимость изготовления	≥\$ 10000	≤\$ 100

ческими размерами превышает десятки тысяч долларов, поэтому интенсивное развитие получили модернизированные установки для контактной печати, в которых для передачи изображения вместо шаблонов используются штампы – наноимпринт литография (НИЛ) для переноса субмикронного и нанометрового изображений [5]. Шаблон применяется в качестве своеобразного штампа, при помощи которого изображение в маскирующем слое создается посредством его оттиска с последующей полимеризацией полученного рисунка УФ-излучением при комнатной температуре в установках УФ НИЛ или стеклованием полимера после нагрева в установках термоконтактной печати, причем в установках НИЛ используются жесткие и мягкие штампы.

Жесткий штамп изготавливается из кварцевого стекла, на рабочей поверхности которого электронно-литографией и анизотропным плазмохимическим травлением формируется рисунок с субмикронными либо нанометровыми размерами. Фактически он изготавливается из фотошаблона для контактной печати посредством дополнительного анизотропного высокоселективного травления кварца на заданную глубину.

Мягкий штамп изготавливается полимеризацией под воздействием УФ-излучения рисунка, сформиро-

ванного жестким штампом в полидиметилсилоксане (ПДМС). Оборудование производится на базе модернизированных установок для контактной печати. Преимущество мягких штампов состоит в их способности принимать форму поверхности рабочей пластины, компенсируя ее неровности при диаметре свыше 200 мм, в то время как рабочая поверхность жестких кварцевых штампов не превышает 26x33 мм². Стоимость изготовления мягких штампов не превышает 50 долл. даже для нанометровых критических размеров. В таблице сопоставлены основные свойства мягких и жестких штампов.

НИЛ, хотя и позволяет переносить размеры уровня менее 50 нм, пока промышленно применяется при переносе размеров от 200 нм. На рис.1 представлены возможности НИЛ по переносу 50-нм рисунка (данные компании EVG). На рис.2 приведены фотографии 2,38-ГГц резонатора на поверхностных акустических волнах, изготовленного с применением НИЛ для формирования 40-нм встречноштырьевых структур алюминия на ниобате лития [6].

Так как перенос рисунка с использованием НИЛ осуществляется контактным методом, искажения, вызванные дифракцией и интерференцией, отсутствуют при любых переносимых размерах. Метод позволяет одновременно переносить на рабочую пластину рисунок с наноразмерными элементами и элементами свыше 100 мкм, что невозможно при оптической литографии из-за разницы во времени экспонирования фоторезиста при переносе наноразмерного и микронного рисунков.

Основное отличие НИЛ-установок от оборудования для кон-

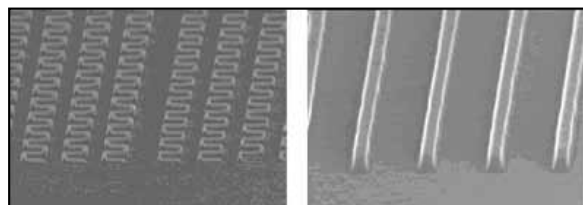


Рис.1. Перенос 50-нм рельефного рисунка наноимпринт литографией с использованием мягкого штампа (компания EVG)

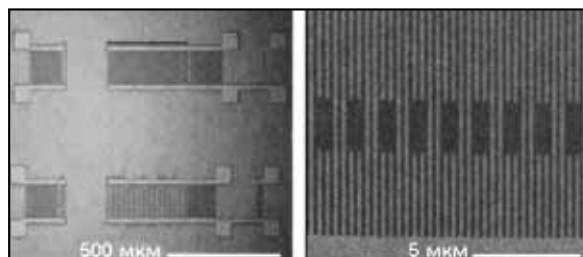


Рис.2. Электронно-микроскопические снимки ПАВ резонатора на 2,38 ГГц, изготовленного с применением НИЛ [6]



тактной печати – наличие дополнительного устройства для прецизионного прижима штампа к рабочей пластине. Дополнительные требования к фоторезистам для НИЛ состоят в их химической инертности и малой адгезии к материалу штампов. Уменьшение адгезии материала фоторезиста обеспечивается применением смачивающих либо покрывающих рабочую поверхность штампа химически инертных органических материалов с низкими значениями поверхностной энергии.

НИЛ начинает успешно конкурировать с проекционной фотолитографией благодаря:

- возможности переноса изображения субмикронного и наноразмерного уровней на пластины различного диаметра;
- одновременному переносу изображения с критическими размерами от 30 нм до 200 мкм;
- отсутствию размерных эффектов при переносе изображения;
- низкой стоимости мягких штампов и оборудования по

сравнению с оптическим литографическим оборудованием того же уровня.

В целом в современной технологии переноса субмикронных и наноразмерных изображений наметилось два основных направления:

- проекционная фотолитография на базе иммерсионных стешперов и установок на экстремальном ультрафиолете;
- контактная литография на базе установок НИЛ.

Экономическая целесообразность использования зависит от стоимости и производительности конкретного оборудования и систем поддержания его работоспособности, а также от стоимости и времени функционирования фотошаблонов. С появлением НИЛ-установок становится экономически целесообразным их применение. Это оборудование на один-два порядка дешевле установок для проекционной печати, рассчитанных на перенос изображения с аналогичными топологическими нормами.

Литература

1. **Валиев К.А., Великов Л.В., Вернер В.Д., Раков А.В.** Субмикронная контактная литография с трафаретными шаблонами.–Электронная промышленность, 1983, № 1, с. 36–38.

2. **Моро У.** Микролитография. Принципы, методы, материалы. В двух частях. Ч.2. – М.: Мир – 1990, 632 с.

3. **H.I.Smith, F.J.Bachner, N.Efremov.** A high yield photolithographic technique for surface wave devices. – J. Electrochem. Soc. 1971, v.118, №5, p.821–825.

4. **B.W.Smith, Y.Fan, M.Slocum, L.Zavyalova.** 25 nm Immersion Lithography at a 193nm Wavelength. – SPIE 2005, № 57547, p.7.

5. **S.Y.Chou, P.R.Krauss.** Imprint lithography with 25 Nanometer Resolution. – Science, 1996, v.272, №5258, p.85–87.

6. **G.F.Cardinale, J.L.Skinner, A.A.Talin, R.W.Brocato, D.W.Palmer, D.P.Mancini, W.J.Dauksher, K.Gehoski, N.Le, K.J.Nordquist, D.J.Resnick.** Fabrication of a surface acoustic wave-base correlator using step-and-flash imprint lithography. – J.Vac.Sci.Technol. B22(6), Nov/Dec.2004, p.3265–3270.