

УДК: 621.382

*Луныкина Татьяна Александровна,
студент магистратуры
МГТУ им. Н. Э. Баумана
Россия, Москва*

ЭЛЕКТРОННАЯ ЛИТОГРАФИЯ КАК НАИБОЛЕЕ ИНОВАЦИОННЫЙ МЕТОД ЛИТОГРАФИИ

В статье говорится о существующих современных методах литографии. Описаны общие шаги процесса литографии в полупроводниковом производстве. Рассмотрены тенденции развития полупроводниковой промышленности в целом.

Произведен анализ методов литографии на основе информации о современной полупроводниковой промышленности, и выбран наиболее инновационный метод литографии: электронная лучевая литография, – как метод, позволяющий повысить технологически уровень полупроводниковой промышленности.

Ключевые слова: полупроводник, полупроводниковое производство, МЭМС литография, фотолитография, экспонирование, травление, длина волны, кремний, фотошаблон, производительность.

*Luniakina Tatiana Aleksandrovna
Master student
BMSTU
Russia, Moscow*

ELECTRONIC LITHOGRAPHY AS THE MOST INNOVATIVE LITHOGRAPHY METHOD.

The article deals with existing modern lithography methods. There are described the general steps of the lithography process in semiconductor production. There are considered the tendencies of semiconductor industry development as a whole.

There was made the analysis of lithography methods based on information about the modern semiconductor industry and the most innovative lithography method was chosen: electron beam lithography, as a method that allows to increase the technological level of the semiconductor industry.

Keywords: semiconductor, semiconductor manufacturing, MEMS, lithography, photolithography, exposure, etching, wavelength, Si, photomask, wafer per hour.

Современную жизнь человека невозможно представить без высокотехнологичных устройств – компьютеров, ноутбуков, смартфонов, автомобилей, телевизоров, и даже кухонных приборов, которые год от года становятся все более автоматизированными и функциональными. В каждом из этих устройств насчитываются десятки микроэлектромеханических систем (МЭМС, или MEMS – microelectromechanical systems) – это всевозможные акселерометры, гироскопы, кремниевые микрофоны, микродисплеи, микрозеркала, устройства микроавтофокусировки, микродатчики, газовые сенсоры, сенсоры давления, элементы электронной оптики, микрокапиллярные устройства. Все перечисленные приборы производятся по одним принципам, так называемым технологиями МЭМС. Данные технологии появились в конце 40-х годов двадцатого столетия в США и с тех пор развивались бурным темпом во всем мире. В общем случае, под МЭМС понимаются различные механико-электрические (сенсорные) или электромеханические преобразователи (актюаторы), характеризующиеся размерами структур от единиц микрон до 1 мм.

Основой технологии производства МЭМС, как и основой технологии изготовления интегральных схем, является планарная технология – совокупность технологических операций, выполняемых послойно на всей поверхности подложки (обычно – вырезанный из монокристалла полупроводник, например, кремний, Si). После каждой технологической операции восстанавливается плоская (планарная) форма поверхности

пластины. Планарная технология позволяет одновременно изготавливать огромное число дискретных полупроводниковых приборов или интегральных микросхем на одной подложке, в едином технологическом процессе, что существенно снижает себестоимость производства (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**). Кроме того, параметры приборов, изготовленных на одной подложке, оказываются близкими. Ограничивает число изготовленных изделий только лишь площадь подложки, поэтому по мере развития технологий производства размер подложек стремятся увеличивать.

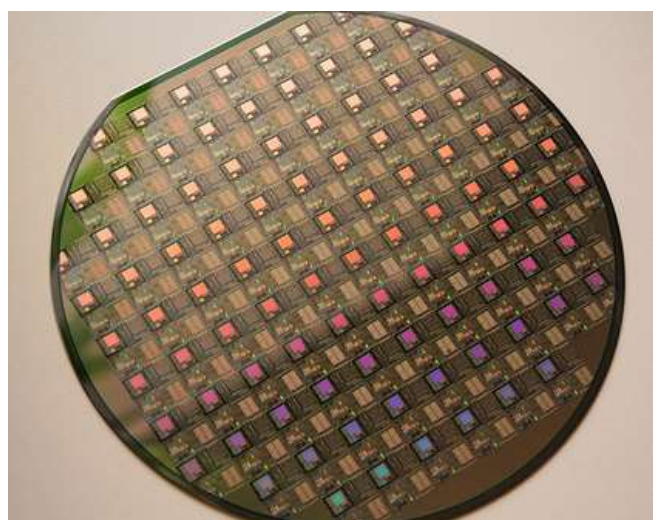


Рис. 1. Кремниевая пластина с изготовленными на ней чипами

Основными операциями, которые могут входить в технологическую цепочку, являются: изготовление и подготовка подложки (например, механическая или химическая полировка), создание на поверхности подложки защитного слоя (например, окисление кремния), фотолитография (включая нанесения светочувствительного слоя – фоторезиста, засвечивание и проявление фоторезиста – стравливание исключительно засвеченных, либо незасвеченных – зависит от типа фоторезиста, участков слоя фоторезиста), стравливание защитного слоя подложки на незакрытых резистом участках, удаление остатков слоя фоторезиста, эпитаксиальное наращивание, осаждение диэлектрических или металлических пленок, внедрение легирующих примесей, плазменное или химическое травление поверхности

подложки, и др. Операции могут объединяться в циклы, схемы их чередования порой бывают запутаны, а количество может достигать нескольких десятков.

Процесс литографии состоит из множества технологических операций, в совокупности предназначенных для формирования рельефного рисунка на специальном чувствительном слое (резисте) при изготовлении полупроводниковых приборов, интегральных микросхем и сверхпроводниковых наноструктур. Сформированный на специально нанесенном слое рисунок, как правило, необходим для последующей обработки поверхности – травления, напыления или электроосаждения, – для переноса рельефного рисунка непосредственно на структурный слой или подложку.

Существуют несколько основных принципиально разных видов литографии – оптическая фотолитография, ультрафиолетовая фотолитография, фотолитография в глубоком ультрафиолете, рентгеновская литография и электронная литография. Основное отличие методов в способе засветки резиста. В первых трех случаях для засветки используется свет (видимый или ультрафиолетовый), в случае рентгеновской литографии используется рентгеновское излучение и в случае электронной литографии используется поток электронов соответственно.

Первым шагом литографии является подготовка поверхности. Поверхность подложек очищают, чтобы обеспечить высокую смачиваемость раствором полимера и, соответственно, адгезию резиста, а также, чтобы удалить загрязнения и исключить включение примесей. Недостаточная степень очистки поверхности, наличие значимых по размеру микрочастиц на ней, может приводить к проколам в тонком слое резиста, и, как следствие, к последующим дефектам на пластине, поэтому правильной подготовке поверхности на предприятиях уделяется большое внимание.

Следующим шагом литографии является нанесение резиста на пластину. Далее следует экспонирование – процесс избирательного облучения резиста электромагнитным излучением. В массовом производстве наиболее широко применима оптическая литография, или фотолитография. Принципиальное отличие этого вида литографии от других состоит в способе экспонирования – оно проводится светом (ультрафиолетом или видимым) через специальный фотошаблон (маску со сформированным на ее поверхности рисунком элементов).

Следующим после экспонирования этапом литографии является проявление резиста. При проявлении части резиста удаляются специальной жидкостью-проявителем, формируя окна в пленке резиста.

Как правило, фотолитография тесно связана с технологическим этапом, для которого собственно и требуется получаемый из фоторезиста рисунок. Наиболее распространённым процессом на этом этапе является травление, хотя нередко применяются и такие процессы как электроосаждение и напыление при проведении обратной фотолитографии.

Завершающим этапом литографии является удаление резиста с поверхности пластины. Для этого используют разные способы, например, обработку в органических растворителях с механическим воздействием, ионно-плазменную обработку поверхности, кипячение в кислотах. Если на предыдущих этапах применялись усилители адгезии или антиотражающие покрытия, они, как правило, также удаляются.

В Таблице 1 приведены данные о различных методах литографии. Основными параметрами, описывающими методы литографии, являются:

- 1) длина волны (нм, длина волны излучения для экспонирования резиста);
- 2) разрешение (мкм, максимальная разрешающая способность метода, наиболее важный фактор литографии, описывающий минимальный размер получаемых элементов на подложке);

3) наличие шаблона (шаблон необходим для нанесения требуемого рисунка на обрабатываемую поверхность, это один из наиболее затратных элементов в системе литографии);

4) производительность (количество обрабатываемых пластин диаметром 200 мм в час).

Характеристика процесса	Длина волны излучения, нм	Практическое разрешение, мкм	Шаблон	Производительность
Оптическая литография	400	0,4–1,0	Необходимо наличие	160 пластин/ч
Ультрафиолетовая фотолитография на эксимерных лазерах	193	До 0,9	Возможно выполнение как с шаблоном, так и без	80-90 пластин/ч
Фотолитография в глубоком ультрафиолете	13,5	0,022	Необходимо наличие	90 пластин/ч
Рентгеновская литография	0,4 - 5	0,01	Необходимо наличие	60 пластин/ч
Электронная литография	0,001 - 1	До 1	Не нужен	10 пластин/ч

Анализирую данные из Таблицы 1, можно выделить достоинства и недостатки каждого метода литографии.

Достоинством оптической литографии, как и литографии на эксимерных лазерах, является обработанность технологических процессов, так как метод является наиболее распространенным, его простота в исполнении и высокая производительность. Минусы метода в сравнительно низком разрешении, наличии дорогостоящих шаблонов.

Фотолитография в глубоком ультрафиолете отличается от предыдущих методов тем, что проводится в вакууме, что говорит о чистоте процесса, и имеет более высокое разрешение.

При явных плюсах рентгеновской литографии: высокое разрешение, проведение в вакууме (чистота процесса), – метод имеет существенные минусы. Это необходимость в дорогостоящих шаблонах, которые очень сложны в изготовлении. А также существует затруднение в фокусировке рентгеновских лучей.

Для изготовления полупроводниковых изделий с помощью электронной литографии не требуется наличие дорогостоящих шаблонов.

То есть если рассмотреть следующую ситуацию: существуют два производства (условно, А и Б), на А используется оптическая литография, требующая наличие различных индивидуальных дорогостоящих шаблонов для изготовления того или иного вида продукции. На предприятии Б используется в производстве метод электронной литографии, не требующий шаблонов или дорогостоящей оптической системы с источником света. К слову, установки оптической литографии дороже и сложнее, чем установки электронной литографии. Развиваясь, производству необходимо расширять ассортимент производимых изделий, запускать новые продукты. Для предприятия А этот процесс встанет в огромную сумму (переход на новый технологический процесс, создание новых шаблонов), при условии существования рисков (необходимость доработки или полного изменения процесса изготовления изделий, а соответственно, и изготовления новых шаблонов). Предприятию Б достаточно будет настроить установку электронной литографии под процесс без каких-либо затрат, что будет явным плюсом. Можно сделать вывод, что предприятие Б сможет развиваться и создавать что-то новое быстрее, затрачивая на это минимальное количество времени и средств. Также электронная литография позволяет получать максимальное разрешение. Однако производительность

метода сравнительно низкая, что можно компенсировать наличием нескольких установок электронной литографии.

Преимущества многолучевой электронной литографии находятся в различных областях – и все они ведут к уменьшению стоимости и увеличению адаптивности технологических процессов, используемых в производстве интегральных схем (ИС). Данная технология может быть использована как для пластин диаметром 300 мм, так и 200 мм.

Сам метод электронно-лучевой литография применяется для изготовления субмикронных и наноразмерных топологических элементов посредством экспонирования электронным лучом электрически чувствительных поверхностей.

Главные элементы экспонирующей электронно-лучевой системы – источник электронов, системы фокусировки и бланкирования луча (Рис.2), устройство контроля совмещения и отклонения, электромеханический стол и компьютерный интерфейс.

Электронный пучок, остророфокусированный с помощью магнитных линз на поверхность слоя полимера, чувствительного к электронному облучению, прорисовывает на нем изображение, которое обнаруживается после обработки резиста в проявителе. Участки поверхности, с записанным на них изображением, очищаются от резиста с помощью проявителя.

Перемещение электронного пучка по поверхности осуществляется с помощью компьютера изменением токов в отклоняющих магнитных системах. В некоторых установках при этом меняется форма и размеры пятна электронного пучка.

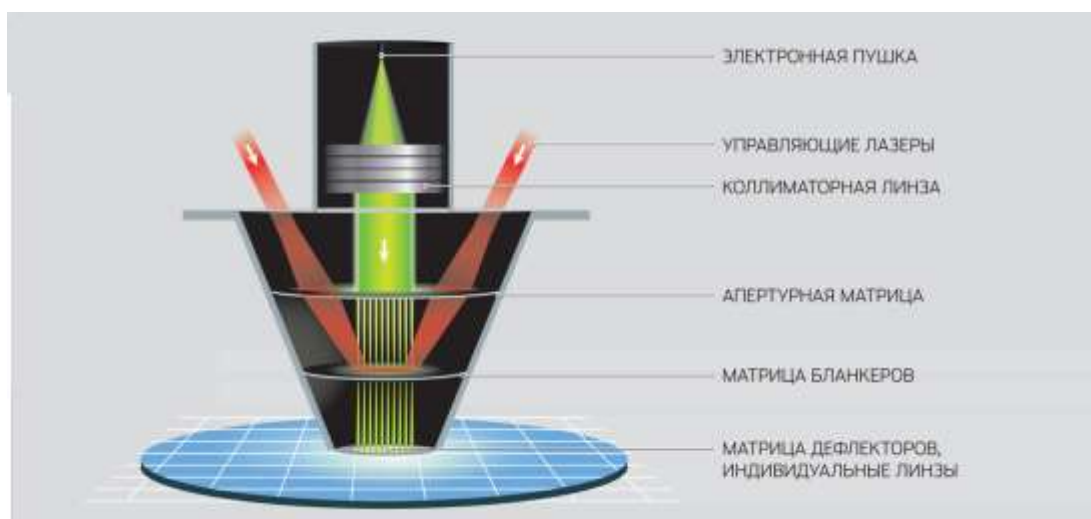


Рис. 2. Схема рабочей части установки электронно-лучевой литографии на примере установки производства Mapper Lithography

Таким образом в можно выделить следующие свойства электронной литографии, позволяющие назвать этот метод в МЭМС производстве наиболее инновационным:

- адаптивность к различным техпроцессам (осуществление для техпроцессов с различными размерами, таким образом, производителю интегральных схем больше не нужно менять оборудование для литографии при переходе на более передовые техпроцессы);
- гибкость дизайна интегральных схем (многолучевая электронная технология не требует изготовления масок – необходимого компонента оптической литографии. Она позволяет напрямую создавать рисунок в резисте различной сложности – избегая ограничений, налагаемых производством масок);
- возможность мелкосерийного производства (так как многолучевая электронная литография не требует масок, открываются новые возможности для производства малых партий изделий. Во-первых, стоимость набора масок для современного полупроводникового производства может достигать нескольких миллионов долларов. В результате производство партии в несколько сотен пластин становится невыгодным и ведущими игроками на рынке становятся несколько крупных компаний, производящие огромные

объемы интегральных схем (такие как Intel, Samsung, TSMC и GlobalFoundries). Во-вторых, отсутствие масок позволяет существенно сократить время на разработку новых продуктов и ускорить их выход на рынок, что дает существенные конкурентные преимущества в современном быстроменяющемся мире электроники);

– Экономическое преимущество – меньшая стоимость литографической машины (стоимость установок электронной литографии существенно меньше классических альтернатив – машин иммерсионной или ЭУФ литографии. Данное преимущество в некоторой степени компенсируется более низкой производительностью электронной литографии, но для небольших объемов производства (многие фабрики производят несколько тысяч пластин в месяц) представляет собой финансово привлекательную альтернативу классической фотолитографии);

– Экономическое преимущество – отсутствие масок (интересной особенностью электронной технологии является отсутствие масок. При цене набора масок, достигающего до нескольких миллионов долларов США, установки электронной литографии окупаются при смене довольно небольшого количества продуктов).

Список литературы

1. Д. С. Саленко, «История развития и области применения технологии МЭМС», Автоматика и программная инженерия, № 3 (5), pp. 68-74, 2013.
2. С. Сысоева, «МЭМС-технологии – простое и доступное решение сложных системных задач», Электроника: Наука, Технология, Бизнес, № 7, pp. 80-89, 2009.
3. С. Е., «SEMICON Russia как зеркало мировой промышленной революции. Новые времена - новая концепция», Электроника: Наука, Технология, Бизнес, № 7, pp. 80-89, 2009.

4. У. Д.М., «Концепция по развитию производства МЭМС-изделий в России на период до 2017 г.», новости // нано- и микросистемная техника, 2012.
5. Б.Я. Кампхербек, Э. Хуберихт, М. Вееда, Д. Шамирян Новые возможности для полупроводникового производства в России // ООО «Маппер». Москва. 2015.