

УДК 621.3.049.77

ФОТОЛИТОГРАФИЯ В ГЛУБОКОМ УЛЬТРАФИОЛЕТЕ

Снопков П.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
филиал Минский радиотехнический колледж,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Кусенок Е.Н. – преподаватель высшей категории дисциплин общепрофессионального и специального циклов, председатель ЦК «Микро- и нанoeлектроника»

Аннотация. Рассмотрен новейший метод фотолитографии с применением излучения в глубоком ультрафиолетовом спектре, технология и средства его обеспечения. Рассмотрены преимущества и недостатки в сравнении с другими методами.

Ключевые слова: фотолитография, ультрафиолетовое излучение, фотошаблон, фоторезист.

Фотолитография – это процесс формирования в чувствительном к определенному излучению слое, нанесенном на поверхность подложки, рельефного рисунка, повторяющего строение полупроводниковых приборов или ИМС, и последующего переноса этого рисунка на подложку. Сформированный фотолитографией рисунок позволяет также наносить через окна в слое фоторезиста необходимые металлические и/или диэлектрические покрытия. При изготовлении полупроводниковых интегральных микросхем (ИМС) применяются различные методы фотолитографии.

Основным недостатком классической фотолитографии, излучением при которой является свет с длиной волн ~ 400 нм, является ее низкое разрешение: минимальный размер элементов составляет 2 мкм [2]. В результате увеличиваются габариты и масса конечного изделия. В наши дни требуется возможность изготавливать элементы с размерами в несколько десятков нанометров.

Более высокого разрешения позволяет добиться метод фотолитографии в глубоком ультрафиолете (англ. EUVL – Extreme Ultraviolet Lithography). При EUV-литографии используется излучение на длине волны около 13,5 нм (граница ультрафиолетового спектра).

Излучения с малой длиной волны легко рассеиваются. Чтобы снизить этот негативный эффект, процесс EUV-литографии должен осуществляться в вакууме и с использованием специальных средств в оптической системе, генераторе излучения и подложке.

Устройство источника излучения представлено на рисунке 1. Для генерации мощного излучения на длине волны 13,5 нм при фотолитографии в глубоком ультрафиолете применяют высокотемпературную плазму, получаемую из топливного материала. Генерация плазмы осуществляется посредством электрического импульса или интенсивного лазерного облучения. В качестве «топлива» используют такие материалы, как ксенон, олово и литий. Олово на сегодняшний день является ведущим «топливом» для высокопроизводительных источников из-за более эффективного преобразования энергии лазерного излучения по сравнению с ксеноном и литием.

Для фокусировки излучения применяют специальную оптическую систему. Точку, в которой свет фокусируется, называется промежуточным фокусом и соединяет модульный источник-коллектор с системой проекционных зеркал EUVL-сканера. Из-за геометрических ограничений в конструкции коллектора, эффективности отражающей системы коллектора и поглощения остаточными газами испаряющегося олова, только часть излучения от источника передается на пластину

Оптическая система EUVL включает отражающую поверхность, используемую для эффективной передачи света на фотошаблон, и отражающую проекционную оптику для воспроизведения топологии на фоторезисте.

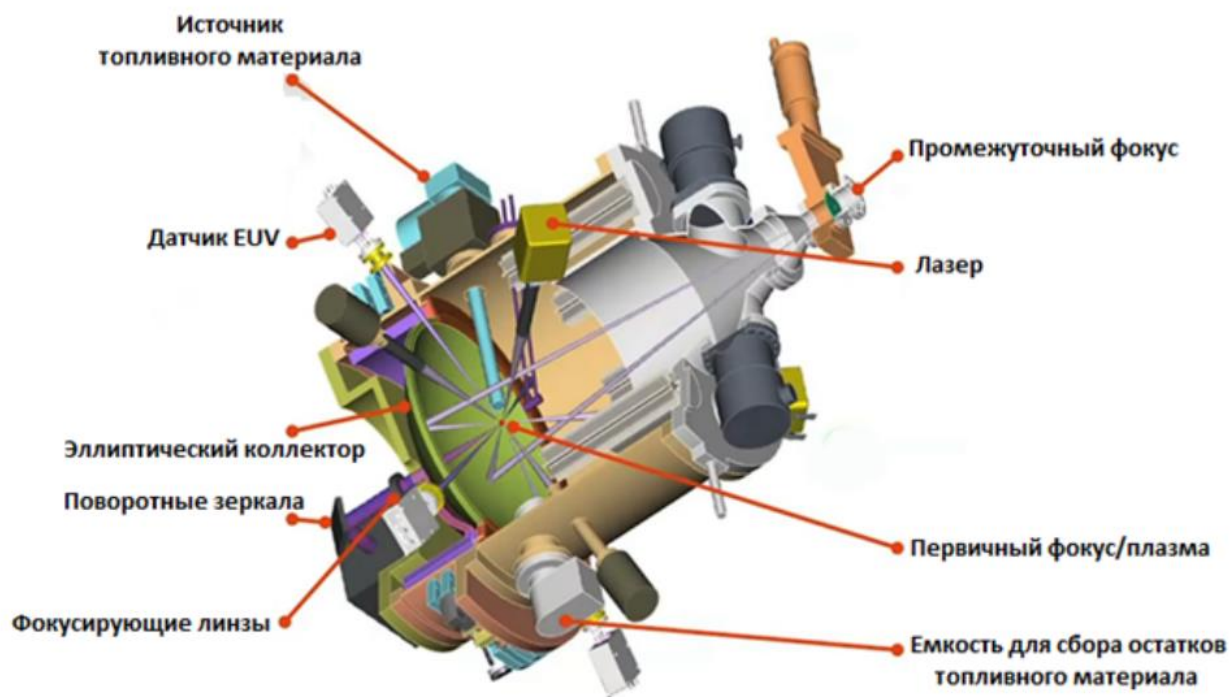


Рисунок 1 – Устройство источника излучения

Светоотражающая оптика состоит из повторяющихся пар из металла (с высоким атомным числом) и спейсера, материала с низким атомным числом. Наиболее часто используют системы Mo/Be и Mo/Si, поскольку они демонстрируют лучшие показатели отражающей способности. Типичное количество слоев для системы Mo/Si равно 40.

Качество многослойного покрытия зависит в первую очередь от метода осаждения и определяет отражательную способность зеркал. Самым распространенным методом формирования данного рода покрытий является магнетронное распыление.

Большое влияние на качество покрытия оказывают загрязнения, в частности, углеводороды и вода, которые, окисляясь при попадании на них фотонов, вызывают потерю отражающей способности. Способами для сокращения загрязнений является использование защитных покрытий, которые устойчивы к окислению, таких как рутений, а также улучшение условий вакуума и использование методов очистки от углеродных и кислородных образований.

Чтобы избежать поглощения волны света при EUV-литографии, фотошаблон должен обладать высоко отражающими свойствами. Для изготовления заготовки для шаблона необходима плоская, жесткая и бездефектная подложка с низким коэффициентом теплового расширения материала и с минимальными искажениями. На такой подложке происходит осаждение отражающей многослойной структуры, состоящей из чередующихся слоев Mo/Si, и покрывается специальным слоем для предотвращения окисления. Расположение слоев фотошаблона показано на рисунке 2.

Абсорбционный слой эффективно поглощает падающее на него излучение. Для таких целей обычно используют нитрид тантала (TaN). Процесс изготовления EUVL-шаблона аналогичен процессу для оптического шаблона классической фотолитографии, но с более жесткими ограничениями на технические характеристики. Материал буферного слоя, например, SiO₂ или рутений, применяют для защиты многослойной структуры во время травления или восстановления абсорбирующего слоя. Воспроизведение на поверхности топологии осуществляется посредством ионно-лучевой литографии и плазменного травления.

Чтобы избежать дефектов на рабочей пластине, шаблон EUVL должен проходить без дефектов в процессе производства и оставаться таким в процессе работы. Необходима надежная и точная проверки шаблона для оценки дефектности на всех этапах его производства.

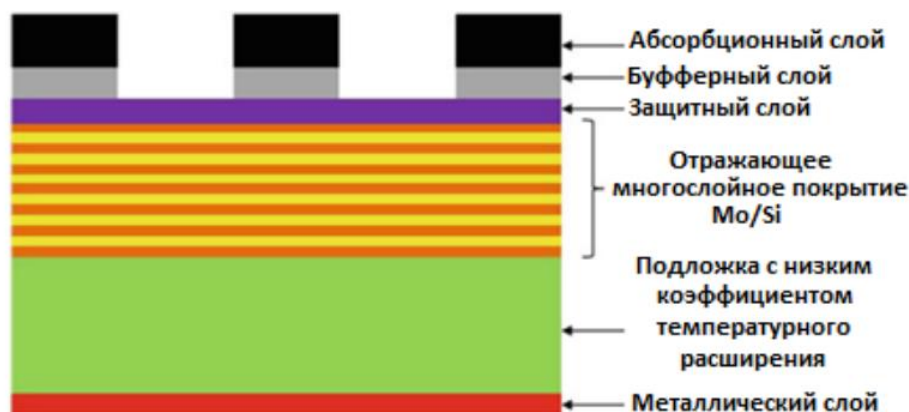


Рисунок 2 – Строение фотошаблона

Высокая энергия фотонов ультрафиолетового излучения ионизирует компоненты фоторезиста, генерируя вторичные электроны, которые способствуют нежелательным химическим реакциям в процессе экспонирования. Таким образом, без подготовки фоторезисты не могут использоваться в данном методе, поскольку имеют высокую чувствительность и будут разрушаться. Необходимо крайне точно отрегулировать концентрацию фотокислот и достичь оптимального коэффициента поглощения [1].

Значительной проблемой метода являются неравномерные границы печати, продемонстрированные на рисунке 3. Использование волн с длиной в 13,5 нм приводит к повышению энергии фотонов в 14 раз по сравнению с 400 нм волнами классической литографии. В свою очередь, управлять такими фотонами становится намного сложнее, поэтому только 40 % фотонов в точности придерживаются заданной траектории, а 60% отклоняются в стороны и формируют шумы. Это не оказывает критического влияния на работоспособность устройства, но снижает его энергоэффективность. Проблема связана даже с распознаванием подобных дефектов, поскольку они имеют размеры около 0,3 нм.

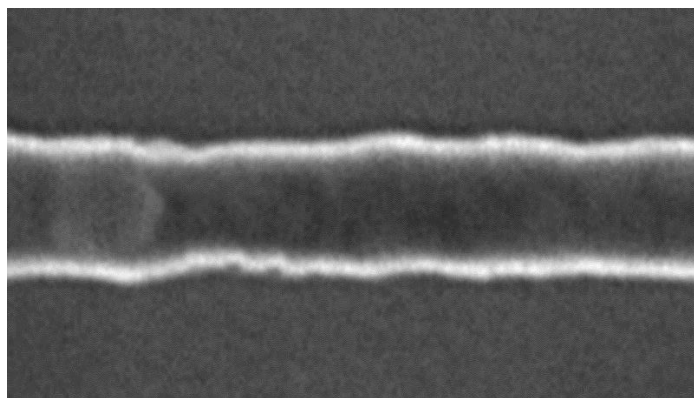


Рисунок 3 – Неравномерная граница EUV-литографии

Метод фотолитографии в глубоком ультрафиолете является одним из самых перспективных благодаря высокой разрешающей способности и позволяет осуществлять производство 7 нм и даже 5 нм топологических норм. Однако массовое использование данного метода ограничено ввиду высокой стоимости оборудования и возникновения специфических физических явлений, которые возникают при столь малых размерах.

Список литературы

1. Баклыков Д.А. Особенности фотолитографии в глубоком ультрафиолете / Баклыков Д.А., Громов М.И., Тацев Р.А // Политехнический молодежный журнал МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2019. – №10. – С.1–9
2. Технология полупроводников приборов и изделий микроэлектроники. Кн. 8. Литографические процессы / В.В. Мартынов, Т.Е. Базарова. – М.: Высш.шк., 1990. – 128 с.