в зависимости интересующего диапазона длин волн и требуемой чувствительности. В настоящее время для этих целей используются различные типы охладителей: машина Стирлинга, импульсные охладители, охладители Джоуля-Томсона, термоэлектрические охладители.

Машина Стирлинга является самым распространенным методом криогенного охлаждения. Принцип работы машины Стирлинга основан на работе двигателя, преобразующего тепловой поток в механическую энергию. Этот цикл обратим, и обратный цикл Стирлинга используется в холодильных установках, преобразующих механическую энергию в поток тепла. Недостатками данного метода является шумность охлаждающей системы и большое время выхода в рабочий режим.

Импульсные трубочные охладители используют такой же компрессорный блок, как и в охладителе Стирлинга, чтобы создать давление. Главная разница заключается в том, что в импульсной трубке нет подвижных частей для перемещения рабочего газа между горячей и холодной сторонами. Геометрия самого устройства позволяет газу течь к холодной стороне сразу перед сбросом давления (эффект охлаждения). Данный охладители обладают очень высокой надежностью и сроком службы. Сообщалось, что пульсирующие криохолодильники работают более 10 лет непрерывно без каких-либо потерь в производительности. Недостатками технологии является размер, вес и потребление мощности.

Охладители Джоуля-Томсона основаны на охлаждающем эффекте, возникающем при свободном расширении рабочего газа. Газ под высоким давлением поступает в тонкую трубку в криостате и принуждается проходить через откалиброванное отверстие на конце трубки. Охлажденный освобожденный газ возвращается к своему окружению, обмениваясь теплом через стенку трубки с входящим газом. Входящий газ со временем становится все холоднее и холоднее, пока освобожденная жидкость не достигнет устойчивого состояния с фиксированной стабильной температурой: точкой кипения газа, соответствующей фактическому давлению газа в камере выпуска. Недостатком метода является необходимость регулировать расход газа, чтобы он соответствовал требуемой мощности охлаждения. Газ, используемый для охлаждения, должен быть чистым, так как наиболее частый режим отказа охладителя – это препятствие в газовом потоке, вызванное конденсатом примесей.

Работа термоэлектрических охладителей основана на эффекте Пельтье. Когда ток проходит через соединение двух полупроводниковых материалов, происходит либо поглощение тепла, либо его отведение в зависимости от направления тока. Данные охладители могут иметь миниатюрные габариты и стоят дешевле, чем любая другая система. Недостатком является температура охлаждения (нельзя использовать для охлаждения ниже 200 K).

Литература

1. Chrzanowski, K. Review of Thermal Imaging Technology / K. Chrzanowski. – Koczargi Nowe: 2024.
2. Chrzanowski, K. Testing surveillance thermal imagers under simulated real work condition / K. Chrzanowski // Opto-Electronics Review. – 2023. – Vol. 31, № 1.
3. Review on infrared imaging technology / F. Hou [et al.] // Sustainability. – 2022. – № 18. – Art. 11161.
4. Vollmer, M. Infrared thermal imaging / M. Vollmer // Computer Vision: A Reference Guide. – Cham: Springer International Publishing, 2021. – P. 666–670.
5. Paschotta, R. Thermal imaging / R. Paschotta // RP Photonics Encyclopedia. – 2024. – URL: https://www.rp-photonics.com/thermal_imaging.html (date of access: 20.02.2025).

УДК 539.216:621.3.049.75

МЕХАНИЗМ МИКРООБРАБОТКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК НА ФОТОШАБЛОНАХ

Круковский В. А.[1,2], Федорцев Р. В.[2], Юдицкий В. А.[1], Воронцов А. И.[1]

[1]ОАО «ПЛАНАР»
[2]Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Аннотация. Исследован механизм обработки тонких пленок на фотошаблонах с помощью коротких лазерных импульсов.
Ключевые слова: фотолитография, фотошаблон, абляция, обработка тонких пленок.

MECHANISM FOR PROCESSING THIN FILMS ON PHOTOMASKS

Krukouski V. A.[1,2], Fiodartsau R. V.[2], Yuditski V. A.[1], Vorontsov A. I.[1]

[1]JSC «PLANAR»
[2]Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Annotation. The mechanism of processing thin films on photomasks using short laser pulses was investigated.
Keywords: photolithography, photomask, ablation, thin film processing.

Адрес для переписки: Круковский В. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: preferok@gmail.com

Изготовление фотошаблонов является одним из наиболее сложных процессов в микроэлектронике. От точности изготовления элементов фотошаблона зависит точность изготовления микросхем [1]. Технология производства фотошаблонов и оборудование для их нанесения и коррекции постоянно совершенствуются. Основная задача добиться снижения стоимости оборудования, сокращения времени изготовления и повысить качество фотошаблонов.

Компания SEMATECH относит ремонт фотошаблонов к лимитирующему фактору производства микрочипов следующего поколения. При современных литографических методах элементы на чипах обычно в четыре раза меньше элементов на фотошаблонах (4-х кратная литография), но из-за того, что элементы на кремниевой пластине становятся менее 100 нм, теперь уже становится сложно пропускать достаточное количество света через элементы фотошаблонов. Таким образом, приходится добавлять вспомогательные элементы для того, чтобы пропускать дополнительный свет и экспонировать микрочип. Эти вспомогательные элементы на фотошаблонах могут иметь такие же маленькие размеры, как и элементы кремниевой пластины, и таким образом необходимо развивать суб-100 нм технологии ремонта фотошаблонов.

На фотошаблонах, используемых в полупроводниковой литографии, обычно присутствуют дефекты, которые, в зависимости от их размера и расположения, могут сделать маску бесполезной. Так как топология современных фотошаблонов является очень сложной и, соответственно, дорогой в производстве, отбраковывать такие дефектные маски является экономически невыгодным. Поэтому крайне желательно ремонтировать такие дефектные фотошаблоны.

Процесс удаления дефектов должен соответствовать следующим критериям:

а) нижележащий кварц (содовое стекло, Борское стекло) не должен быть поврежден;

б) участки хрома вокруг зоны ремонта не должны ухудшаться в качестве и на них не должны попасть частички удаленного материала;

в) на прозрачные участки фотошаблона вокруг зоны ремонта не должны внедряться частички удаленного материала;

г) зона ремонта не должна быть термически повреждена;

д) метод ремонта должен быть способным удалять наименьшие размеры на фотошаблоне.

До настоящего время фотошаблоны ремонтировались при помощи двух методов – использование лазерных систем и сфокусированного ионного луча, являющегося главной конкурирующей технологией суб-90 нм техпроцесса. Однако оба эти метода имеют недостатки.

Лазерные системы в свое время были лучшим способом ремонта фотошаблонов. Эти системы имеют множество преимуществ, включая высокую производительность, селективное удаление материала на основе его отражательных свойств, а также не требует организации высокого вакуума. Однако для того, чтобы расплавить хром, установки с наносекундными лазерами проецируют пучок высокой интенсивности на дефект достаточно продолжительный интервал времени.

В течение этого времени происходит интенсивный обмен энергией между возбужденными лазером валентными электронами поглощающего материала и фононами кристаллической решетки (что выражается в прямом увеличении температуры поглощающего материала). В зоне оптического поглощения лазерного импульса (и возле нее) материал нагревается до его температуры испарения [2].

В результате этого происходит разбрызгивание небольших частичек материала. Так как процесс удаления сопровождается значительным нагреванием кристаллической решетки в течение относительно долгого периода времени (продолжительность импульса плюс время между импульсами), то вокруг зоны абляции возникает значительная зона термического влияния. Это сказывается на деформации краев элементов топологии и изменении однородности свойств материала. Кроме того, происходит диффузия металла в стеклянную кварцевую подложку фотошаблона, которая ограничивает пространственную разрешающую способность до 500 нм. Воздействие лазерного излучения с длительными импульсами на материал показано на рисунке 1.

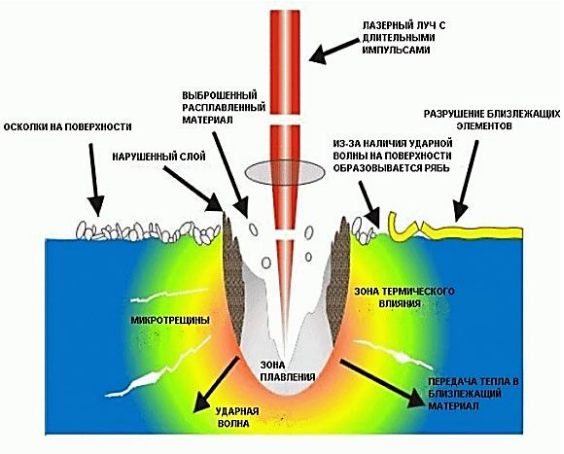

Рисунок 1 – Воздействие лазерного излучения с длительными импульсами на материал

Для решения этих термальных проблем для ремонта самых современных фотошаблонов стали использоваться ионные лучи, которые можно сфокусировать в пятно менее 25 нм. Ионные лучи уносят хром, пока он еще находится в твердом состоянии, посредством использования потока ионов галлия для распыления хромовых дефектов. Остатки хрома далее уносится при помощи газа, протекающего над пластиной. Однако, если не отключить ионный луч точно в нужный момент, начинается диффузия галлия в кварц, из-за чего существенно уменьшается пропускание

кварца в зоне ремонта. Также можно перетравить стекло, в результате чего образуются питы (подрыв в стекле). Кроме того, так как маска является стеклянной, то существуют проблемы с точным наведением луча.

Сфокусированный ионный луч, требует частой трудоемкой наладки и калибровки по сравнению с использованием лазерных систем. Для достижения хорошей пространственной разрешающей способности, значение тока должно быть небольшим, что пропорционально замедляется и скорость ремонта.

Развитие технологии сверхкороткоимпульсных [2–4] лазеров и последующие исследования их воздействия на различные материалы дало резкий толчок для применения этих лазеров во многих новых и уникальных задачах в различных областях. Кроме уникальной возможности подвергать абляции практически любые твердые материалы, фемтосекундные лазеры используются в таких областях, как биомедицина, микрооптика, стекловолоконная оптика и телекоммуникации. Усовершенствование конструкции сверхбыстрых лазеров позволило эффективно использовать их и в промышленных задачах, в том числе и для ремонта фотошаблонов.

Использование ультракоротких световых импульсов является новым этапом и для ремонта фотошаблонов и предлагает множество преимуществ по сравнению с системами, использующими сфокусированные ионные лучи или лазеры с наносекундной или фемтосекундной длительностью. В число этих преимуществ входят высокие скорости удаления, разрешающая способность меньше размера сфокусированного пятна, минимальная редепозиция (переосаждение) удаленного материала и незначительная зона термического влияния.

Фемтосекундные лазеры позволяют точно производить микрообработку материала благодаря своим коротким (менее 10^{-13} секунды) импульсам. За такой короткий промежуток времени тепло от лазера не успевает уйти от места фокусировки в близлежащую зону, что улучшает качество конечного продукта. Для сравнения, наносекундные лазерные импульсы взрывают материал, разбрасывая микроскопические частички и образуя микроскопические волны в тех местах, где материал был расплавлен. При их более коротких и интенсивных импульсах фемтосекундные лазеры испаряют материал, что позволяет удалять выбранные слои хрома на фотошаблоне без влияния на оптическое пропускание диэлектрической подложки. Воздействие лазерного излучения с короткими импульсами на материал показано на рисунке 2.

Воздействие фемтосекундных импульсов имеет радикально отличные механизмы поглощения световой энергии и удаления материала (абляции) [2]. Механизмы взаимодействия энергии лазерных фотонов с материалом поглотителя проходят две различные фазы поглощения лазерных фотонов, что соответственно сказывается на собственно абляции материала и удавлении газообразных продуктов из околоповерхностной зоны фотошаблона (рисунок 3). Первоначально лазерный фотон поглощается электроном внешней оболочки материала поглотителя посредством, в порядке увеличения плотности энергии лазерного излучения, обратного Brehmesstralung [4], резонансного поглощения и мультифотонного поглощения.

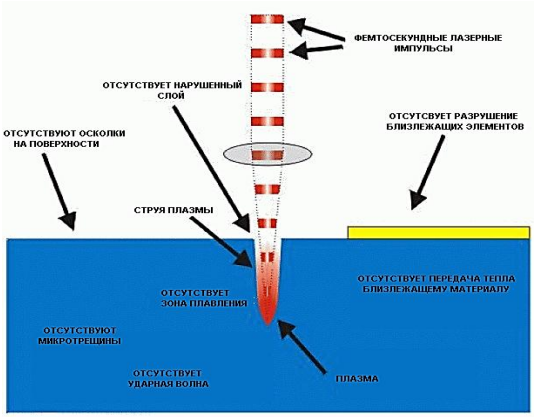

Рисунок 2 – Воздействие лазерного излучения с короткими импульсами на материал

Рисунок 3 – Схематическое представление последовательности лазерной абляции

В материалах с более диэлектрической природой (большая ширина запрещенной зоны), эти три механизма поглощения фотонов образуют свободные электроны, распространяющиеся в кристаллической решетке этих материалов. Эти свободные электроны придают материалам более металлические свойства, благодаря чему значительно увеличивается оптическая поглощательная способность материалов. Кроме того, эти свободные электроны могут ионизировать другие атомы. Таким образом, поглощенная энергия фотонов распространяется по кристаллической решетке посредством механизмов лавинной и мультифотонной ударной ионизации. Таким образом, в более диэлектрических материалах эти два явления становятся механизмами улучшенного поглощения фотонов и распространения энергии посредством ионизации. Последний вариант – мультифотонная ударная ионизация – наблюдается при более высоких плотностях энергии лазерного излучения и, как было обнаружено опытным путем, подвергает абляции чистые диэлектрики, так как для этого необходимо, чтобы связанный электрон внешней оболочки

поглотил два (или более) лазерных фотона в течение некоторого критического промежутка времени.

Материалы с металлическими свойствами, которые слабо коррелируют со оптической поглощательной способностью, потенциально могут показывать абсолютно другие механизмы поглощения фотонов и передачи энергии кристаллической решетке. Причиной этих отличий являются высокая плотность свободных электронов вместе с высокими мобильностью и плотностью состояний энергетических переходов. Эти свободные электроны легко поглощают одиночные фотоны с широким диапазоном энергий. Эта энергия легко передается ближайшим электронам проводимости, что увеличивает «электронную температуру». Электронная температура является аналогом обычной температуры, за исключением того, что она связана с энергетикой и передачей энергии среди электронов проводимости в противоположность вибрациям атомов в кристаллической решетке. Минимальный временной интервал взаимодействий, связанных с электронной температурой, также как и с механизмами ионизации, описанными для диэлектриков, составляет порядка десятков фемтосекунд. Высокоэнергетические электроны потенциально могут, при наличии достаточного времени, отдать свою энергию на нагрев кристаллической решетки, однако кинетика этого процесса зависит от параметров связи электрон-фонон, что в свою очередь связано с вероятностью такого взаимодействия. В большинстве материалов такие взаимодействия лежат в диапазоне пикосекундного интервала. Если можно создать достаточно высокую интенсивность электромагнитного поля, что обычно и происходит при фокусировании фемтосекундных лазерных импульсов, то считается, что эти высокоэнергетические взаимодействия имеют более высокую вероятность проявления. В результате удаление материала происходит до каких-либо термических взаимодействий с кристаллической решеткой. Именно потому, что энергия уходит из области удаления материала до того, как произойдет термическое нагревание кристаллической решетки, абляцию посредством фемтосекундных лазеров часто называют «холодной абляцией».

После того, как лазерный фотон поглощен, и его энергия перешла в близлежащую кристаллическую решетку, могут начаться процессы, которые ведут к удалению материала (абляции). На данный момент существуют две теории механизма абляции, одна из которых – это термальное испарение (сильная абляция), а другая – кулоновский взрыв (легкая абляция). При термальной абляции значительная часть энергии фотонов расходуется на нагревание кристаллической решетки, в результате чего некоторая часть материала достигает своей температуры испарения. Кулоновский взрыв происходит, когда механизмы распространения энергии посредством ионизирующих электронов (лавинная, многофотонная ударная ионизация и т. д.) положительно заряжают ближайшие атомы кристаллической решетки. Как только достигается критическая сила отталкивания электрического поля, ионизированные атомы начинают быстро разлетаться друг от друга, унося с собой большую часть энергии лазерных фотонов.

Баланс между этими двумя механизмами задается электронной структурой удаляемого материала, интенсивностью лазерного излучения и количеством импульсов, участвующих в процессе абляции. Для диэлектрических материалов с широкой запрещенной зоной вероятность кулоновского взрыва больше, чем для металлических материалов. Основополагающей причиной этого является большая подвижность электронов в металлах, которая, возможно, из-за механизмов экранирования электронов препятствует ионизации. Увеличивая интенсивность лазерного излучения для усиления механизмов мультифотонной ионизации, можно перевесить чашу весов в сторону термальной абляции. Некоторые различия между этими двумя механизмами можно увидеть опытным путем, если рассмотреть в микроскоп убранные абляцией зоны. При термической абляции глубина удаленного поглотителя составляет несколько субмикрон за импульс, а поверхность является довольно шероховатой. При удалении посредством кулоновского взрыва, глубина удаляемого материала составляет несколько десятков нанометров за импульс, поверхность является гладкой, а размеры убираемого материала в плоскости x–y можно контролировать с точностью до нанометров.

После анализа преимуществ и недостатков, описанных выше методов исправления дефектов, было принято решение применять лазерное устранение тонких пленок на фотошаблонах с помощью импульсных лазеров, со следующими техническими характеристиками: длина волны $\lambda = 514$ нм, энергия импульса $E \approx 100$ мкДж, длительность импульса < 300 фс, частота следования импульсов кГц диапазона.

Лазерный метод устранения дефектов успешно применяется ОАО «ПЛАНАР» в установках типа ЭМ-5001В и ЭМ-5131, производимых на предприятии.

Литература

1. Лысенко, А. В. Контроль фотошаблонов с использованием цифровых методов / А. В. Лысенко, Д. М. Никулин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2022. – Т. 6. – С. 134–142.

2. Bovatsek, J. Thin film removal mechanisms in ns-laser processing of photovoltaic materials / J. Bovatsek [et al.] // Thin Solid Films. – 2010. – Vol. 518, №. 10. – P. 2897–2904.

3. Либенсон, М. Н. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Конспект лекций. Часть I. Поглощение лазерного излучения в веществе / М. Н. Либенсон, Е. Б. Яковлев, Г. Д. Шандыбина; под общ. ред. В. П. Вейко. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 141 с.

4. Вейко, В. П. Опорный конспект лекций по курсу «Физико-технические основы лазерных технологий». Раздел: Лазерная микрообработка / В. П. Вейко. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – 110 с.