

УДК 621.389

## МЕТОД СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ЧИСТОТЫ КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖЕК

Свертков Егор Витальевич<sup>(1)</sup>, Шишпанов Сергей Николаевич<sup>(2)</sup>

*Студенты 4 курса,  
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»  
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Сидорова С.В.,  
ассистент, инженер кафедры «Электронные технологии в машиностроении»*

### Введение

Полупроводниковые пластины (подложки) в микротехнологии играют очень важную роль. Они являются основанием для группового формирования на них ИМС (интегральная микросхема), главным элементом конструкции ИМС, выполняющим роль механической опоры, обеспечивают теплоотвод и электрическую изоляцию элементов. Также подложки являются основанием для формирования на них различных наноструктур.

При производстве микроэлектронных изделий осуществляется прохождение полупроводниковых пластин по технологическому маршруту, в процессе чего они взаимодействуют с различными средами. В результате неизбежны привносимые дефекты и загрязнения, которые существенно снижают выход годных изделий. Следы этих веществ вносят нежелательные коррективы в технологические параметры изделий. Загрязнения происходят за счет адсорбции примесей из технологических сред, на обрабатываемых поверхностях остаются частицы полировальных паст, продукты разложения фоторезиста, продукты травления поверхности и т.д.

Требования к чистоте поверхности зависят от уровня реализуемой технологии и параметров изготавливаемого изделия.

Поэтому в мировом производстве изделий микроэлектроники уделяется большое внимание процессам очистки подложек и снижения уровня загрязнений.

### Источники и виды загрязнений

Основными источниками загрязнений поверхности пластин и подложек являются:

- абразивные и клеящие материалы, кремниевая пыль при механической обработке;
- пыль в производственных помещениях;
- предметы, с которыми соприкасаются пластины и подложки (оборудование, инструмент, оснастка, технологическая тара);
- технологические среды;
- органические и неорганические реагенты, вода;
- одежда и открытые участки тела операторов и др.

Загрязнение пластин и подложек практически возможно на всех операциях технологического процесса изготовления кристаллов и сборки ИМС.

Возможные загрязнения на поверхности пластин и подложек классифицируют, как правило, по их физико-химическим свойствам, так как они определяют выбор методов удаления загрязнений. Наиболее распространенными являются загрязнения следующих видов:

- физические загрязнения - пылинки, ворсинки, абразивные материалы, силикаты, кремниевая пыль и другие посторонние частицы, химически не связанные с поверхностью пластин и подложек.
- загрязнения, химически связанные с поверхностью пластин и подложек - оксиды, нитриды и другие соединения.
- органические загрязнения - жиры, масла, силиконы и другие примеси.
- растворимые в воде загрязнения - соли, кислоты, остатки травителей, флюсы и пр.
- газы, адсорбированные поверхностью пластин и подложек.

На поверхности пластин и подложек одновременно могут присутствовать загрязнения различных видов. Наиболее трудно удаляются органические и химически связанные с поверхностью загрязнения, а также загрязнения от абразивных материалов, полярные газы и ионы, внедренные в приповерхностный слой пластин.

### Методы очистки подложек

По механизму протекания процессов все методы очистки классифицируют на физические и химические, а по применяемым средствам - на жидкостные и сухие.

Выбор способа очистки (рис. 1) зависит от вида загрязнений. Эффективная очистка достигается при сочетании нескольких способов очистки, поскольку при изготовлении ИМС возможные виды загрязнений проявляются комплексно, а на различных стадиях изготовления к качеству чистоты поверхности предъявляются различные требования. Поэтому для качественной и эффективной очистки пластин и подложек разрабатывают типовые процессы очистки, представляющие собой комбинирование различных способов очистки, выполняемых в определенной последовательности.



Рис.1. Способы очистки подложек и пластин

Жидкостные способы очистки включают в себя обезжиривание, травление в растворах реагентов, промывку в растворах, обработку струей жидкости высокого давления, аэрозольно-капельную очистку, кистевую очистку и тд.

Сухие способы включают термообработку, обработку в парах химических реагентов, различные виды травлений (ионное, плазмохимическое), обработку УФ-излучением, лазерную обработку.

Жидкостные и сухие способы имеют как преимущества, так и недостатки. Например, сухая очистка позволяет минимизировать количество реагентов, уменьшить размеры установок. В то же время при сухом способе очистки возможны повреждения поверхности подложек в результате обработки. Также при жидкостной очистке одновременно обрабатываются обе поверхности подложки, когда при сухой очистке внимание уделяется в основном лицевой стороне.

Для ускорения наименее медленных стадий процессов очистки с целью повышения качества очистки и производительности процессов используют различные

способы их интенсификации, которые достигаются применением физических, химических и комбинированных средств.

К физическим средствам относятся нагрев, кипячение, вибрация, обработка струей, гидроциркуляцией, протоком, гидромеханическая обработка, центрифугирование, ультразвуковая обработка.

К химическим средствам относятся поверхностно-активные вещества, комплексообразователи, катализаторы. Комбинированные средства основаны на использовании физических и химических средств.

### **Контроль качества очистки поверхности**

Контроль степени чистоты поверхности подложек является одной из основных технологических операций, определяющих процент выхода годных изделий микроэлектроники.

На практике применяется большое количество различных методов по оценке качества очистки поверхностей деталей. Существуют разновидности фотометрического метода, масс-спектрометрический, различные электрохимические методы, радиохимические, электронная Оже-спектроскопия (ЭОС), метод локального рентгеновского анализа, вторичной ионной масс-спектропии (ВИМС), сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ).

Методы, основанные на смачиваемости поверхности пластин жидкостями, позволяют фиксировать физическую неоднородность поверхности, обнаруживать органические загрязнения. Указанным методам присущи недостатки: малая чувствительность при низких концентрациях загрязнений; отсутствие возможности контроля других типов загрязнений.

#### ***Метод разрыва водной пленки***

Способ состоит в том, что испытываемые детали погружают на короткое время в ванну с деионизированной водой, а затем вынимают и после стекания избытка воды наблюдают за сплошностью водной пленки на их поверхностях. Разрыв водной пленки свидетельствует о наличии на деталях гидрофобных загрязнений.

Опыт показал, что полностью доверяться этому методу нельзя. Сплошная пленка может образоваться и на загрязненных деталях, когда они плохо отмыты от моющих жидкостей, т.е. при наличии на поверхности таких деталей остатков поверхностно-активных веществ. Устранить ложную смачиваемость можно погружением деталей в слабый раствор кислоты, при этом имеющиеся остатки моющих веществ переходят в гидрофобные жирные кислоты, разрывающие водную пленку.

Рассмотренный опыт вместе с дополнительным погружением в кислоту можно применять лишь для выборочного контроля. На точность метода разрыва водной пленки влияет толщина слоя воды: чем тоньше слой, тем точнее испытание. Поэтому время стекания с деталей избытка воды имеет большое значение, оно выбирается экспериментально для каждого вида деталей. Обычно оно составляет несколько десятков секунд.

#### ***Метод распыления***

По сути, он сходен с предыдущим методом и заключается в том, что на исследуемую поверхность пульверизатором распыляется чистая вода. При этом напылении капельки воды либо смыкаются, образуя непрерывную водную пленку, если поверхность чистая, либо остаются разрозненными, если на поверхности имеются гидрофобные загрязнения. Степень загрязнения поверхности данным методом позволяет выразить количественно. С этой целью берут стеклянную пластинку, на которую наложена прозрачная бумага с миллиметровыми делениями, и, расположив ее так, чтобы она не касалась капелек воды на загрязненной поверхности, очерчивают на ней

контуры загрязненных участков с испытываемой поверхностью, т.е. участков, покрытых каплями воды. Суммируя затем площадь квадратов, занятую капельками, и зная величину общей поверхности, находят их отношение, которое представляет собой выраженную количественную степень загрязнения испытываемой поверхности.

Погрешность такого способа составляет несколько процентов, что вполне приемлемо для практики. Контроль по этому методу необходимо проводить сразу же после извлечения очищенных деталей из ванны для полоскания, не допуская их высыхания; иначе детали могут загрязняться органическими аэрозолями воздуха. Время от момента извлечения деталей из ванны до момента нанесения на них воды из пульверизатора подбирается экспериментально, обычно оно равно 30-60 секунд.

Для лучшей визуальной картинке загрязнений применяют напыление на контрольную пластинку воды, содержащей красящий пигмент. После образования капелек, пластину сушат нагревательной лампой, и на ней возникает контрастный рисунок загрязнений, обусловленный тем, что на чистых участках в сплошной, но очень тонкой пленке воды содержится мало пигмента, а в каплях его значительно больше.

### Метод измерения угла смачивания

Наиболее перспективными и применяемыми на практике являются методы, базирующиеся на использовании закономерностей, имеющих место при смачивании поверхности подложки каплями жидкости. Количественной мерой смачиваемости поверхности служит угол смачиваемости (рис. 2) – угол между касательной к поверхности капли жидкости в точке соприкосновения трех фаз (твердой, жидкой и газообразной) и поверхностью твердого тела, измеренный внутри жидкой фазы.

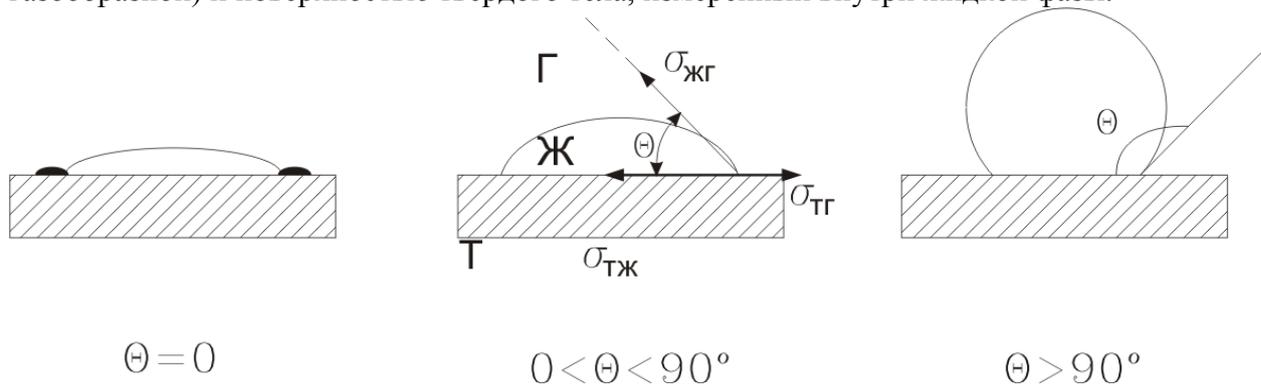


Рис.2. Оценка угла смачиваемости поверхности

Поверхность жидкости стремится принять такую форму, чтобы иметь минимальную площадь. В любом случае следует рассматривать три границы раздела между фазами: газ-жидкость, жидкость – твердое тело и газ – твердое тело. Поведение капли жидкости будет определяться значениями поверхностного натяжения (удельными величинами свободной поверхностной энергии) на указанных границах раздела. Сила поверхностного натяжения на границе раздела жидкости и газа будет стремиться придать капле сферическую форму.

Это произойдет в том случае, если поверхностное натяжение на границе раздела жидкости и твердого тела будет больше поверхностного натяжения на границе раздела газа и твердого тела. В этом случае процесс стягивания жидкой капли в сферу приводит к уменьшению площади поверхности границы раздела жидкость – твердое тело при одновременном увеличении площади поверхности границы раздела газ-жидкость. Тогда наблюдается несмачивание поверхности твердого тела жидкостью. Форма капли будет определяться равнодействующей сил поверхностного натяжения и силы тяжести.

Если капля большая, то она будет растекаться по поверхности, а если маленькая - стремиться к шарообразной форме.

Если поверхностное натяжение на границе раздела жидкости и твердого тела меньше поверхностного натяжения на границе раздела газа и твердого тела, то капля приобретет такую форму, которая позволит уменьшить площадь поверхности границы раздела газ – твердое тело, то есть капля будет растекаться по поверхности тела. В этом случае наблюдается смачивание жидкостью твердого тела.

На поверхностях могут наблюдаться неполное или полное смачивание в зависимости от выбранной жидкости и от состояния поверхности, от степени ее загрязнения, природы этих загрязнений. Измеряя угол смачивания поверхности жидкости с различным поверхностным натяжением, можно количественно оценить состояние поверхности до очистки и на разных этапах ее проведения.

Известен способ определения чистоты поверхности подложек по величине скорости растекания капли жидкости по плоской поверхности, заключающийся в том, что на поверхность исследуемой подложки наносят каплю жидкости, освещают ее потоком света с равномерным распределением интенсивности по сечению светового потока, фиксируют величину интенсивности светового потока фотоприемной матрицей, по скорости изменения величины интенсивности светового потока определяют численное значение скорости растекания капли жидкости.

Однако такой способ определения чистоты поверхности предусматривает падение капли с некоторой высоты, что приводит к колебательному движению капли, а следовательно, и светового потока, что затрудняет процесс анализа функциональной зависимости чистоты поверхности от скорости растекания капли. Другим недостатком этого способа является невозможность регистрации чистоты поверхности с неоднородным распределением загрязнений, наличие которых формирует разные величины скорости растекания в различных направлениях, и измерение значения чистоты поверхности подложки становится затруднительным. Эти недостатки приводят к уменьшению точности, усложнению и удорожанию процесса измерения.

### ***Метод сравнительной оценки степени чистоты подложек***

Поскольку метод оценки чистоты поверхности по ее смачиваемости является наиболее доступным, то именно он был взят за основу в рамках экспериментов в лаборатории кафедры «Электронное машиностроение» МГТУ им. Баумана.

Использованный метод разрешает проблему отсутствия специализированного оборудования и различных специальных средств для определения смачиваемости поверхности. Действительно, в рассмотренных выше способах для измерения угла смачивания необходим специальный стенд, позволяющий наблюдать за каплей жидкости сбоку. В другом методе необходима специальная стеклянная пластинка с наложенной на нее прозрачной бумагой. Использованный же метод позволяет сделать выводы без применения дополнительных средств. Только оценка степени чистоты в данном случае будет являться сравнительной величиной и не позволит давать абсолютную характеристику степени чистоты поверхности.

На основании анализа описанных выше методов можно сделать вывод о связи степени чистоты поверхности и площади горизонтальной проекции капли воды, наносимой на испытываемую подложку (рис. 3). Из двух тестируемых подложек будет чище та, площадь проекции капли которой будет больше.

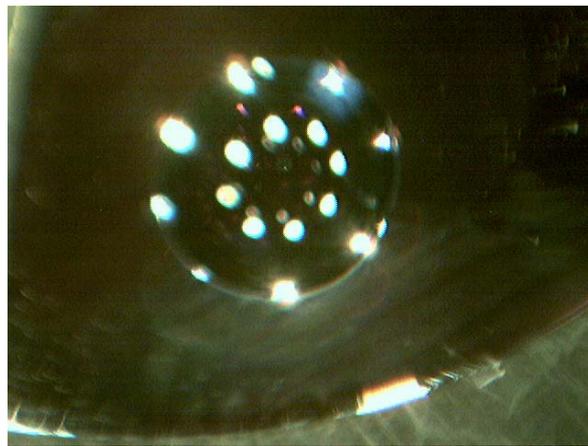


Рис.3. Подложка с каплей для оценки степени чистоты



Рис.4. Экспериментальный стенд для оценки степени чистоты подложек

Экспериментальный стенд (рис. 4) состоит из оптического микроскопа, специализированной камеры для него и компьютера.

Все эксперименты проводятся при одинаковых условиях (при одном и том же увеличении микроскопа). При помощи шприца на подложку наносится капля дистиллированной воды.

Равенство объемов капель в разных экспериментах обуславливается способом нанесения капель на подложку. Он заключается в том, что в каждом случае для нанесения капли осуществляется медленное движение поршня шприца до тех пор, пока капля под тяжестью собственного веса не упадет с поверхности иглы на поверхность подложки. Затем в программе осуществляется сохранение изображения, после чего происходит сравнение габаритных размеров капель в экспериментах.

На основании данных о размерах капель можно сделать сравнительный вывод о чистоте подложек в партии.

Данный способ не является научным, и применять его для серьезных исследований и тем более на производстве не следует. Метод является прикладным и отлично подходит для учебных и других экспериментов, требующих только сравнительный анализ степени чистоты подложек.



Рис.5. Вакуумная установка модульного типа

С помощью данного метода в лаборатории кафедры «Электронное машиностроение» МГТУ им.Баумана был проведен ряд экспериментов.

В первом из них подбирался оптимальный жидкостный очиститель для кремниевых подложек. Как известно, для очистки подложек используются различные растворы. В наших исследованиях чаще всего использовался ацетон или спирт. В результате ряда экспериментов был сделан вывод о том, что кремниевые подложки лучше очищаются спиртом.

Также данный способ имел применение в опытах по конструированию сорбционной вакуумной ловушки для установки нанесения тонких пленок (установка вакуумного напыления) УВН-1 (рис. 5), включающей в себя диффузионный насос. Насос является источником паров масла, которые загрязняют объем камеры и находящиеся внутри нее подложки. С увеличением загрязненности подложек, адгезия пленок снижается.

Экспериментальным путем подбиралось оптимальное количество ступеней вакуумной ловушки для достижения наилучшего результата. Откачка вакуумной камеры проводилась с установленной внутри ловушкой, содержащей соответственно одну, две и три ступени, а также и без нее. Предварительно в камеру загружались очищенные подложки. Затем данным способом определялась степень их чистоты по критерию смачиваемости поверхности. Также для сравнения в эксперименте участвовал образец очищенной, но не погружаемой в рабочий объем, подложки.

Эксперименты показали четкую динамику улучшения степени чистоты подложки, и наилучшие результаты показали опыты с ловушкой, содержащей две ступени.

Поскольку степень чистоты подложки оказывает непосредственное влияние на адгезию пленок, были проведены эксперименты по оценке данного параметра. Для эксперимента на очищенные подложки в установке УВН-1 при использовании конструируемой вакуумной ловушки с разным количеством ступеней наносились тонкие пленки меди.

А затем данная партия проходила исследования при помощи адгезиометра и на АСМ (рис. 6).

Эксперименты показали ухудшение адгезии на более загрязненных подложках, тем самым подтвердив применимость используемого метода оценки степени чистоты подложек.



Рис.6. АСМ-изображения полученного покрытия после проверки адгезии

### Заключение

Представлены и проанализированы некоторые возможные методы контроля степени чистоты поверхности подложек.

Собран и налажен стенд для проведения оценки степени чистоты поверхности подложек по косвенному параметру.

Проведены экспериментальные исследования по оценке степени чистоты подложек.

Приведенный в статье прикладной метод сравнительной оценки чистоты подложек не применим в условиях производства микроэлектронной техники, но он может успешно выполнять задачи в учебных целях и лабораторных исследованиях.

### Литература

1. Вакуумная техника: Справочник / Под общ. Редакцией *Е.С. Фролова, В.Е. Минайчева*. М.: Машиностроение, 1992.
2. *Пипко А.И., Плисковский В.Я., Пенчко Е.А.* Конструирование и расчет вакуумных систем. М.: Энергия, 1970.
3. *Розанов Л.Н.* Вакуумная техника. М.: Высшая школа, 1990.
4. *Деулин Е.А.* Расчет вакуумных систем технологического оборудования: Методические указания. М. 1999.
5. *Панфилов Ю.В., Беликов А.И.* Расчет допустимой дозы привносимой дефектности интегральных микросхем и выбор класса чистоты производственного помещения. М.: МГТУ им. Баумана, 1996.
6. *Минайчев В.Е.* Нанесение пленок в вакууме. М.: Высшая школа, 1989.
7. *Кротова Г.Д., Дубровин В.Ю.* Технология материалов изделий электронной техники. Иваново: ГОУ ВПО ИГХТУ, 2007.
8. *Хруничев Ю.А.* Технология и оборудование производства электровакуумных приборов. М.: Высшая школа, 1979.
9. *Волков А.В., Колпаков А.И.* Способ измерения чистоты поверхности подложек, АС №1821688 от 12.10.1992.
10. *Сойфер В.А., Казанский Н.Л., Колпаков В.А., Колпаков А.И., Подлипов В.В.* Способ измерения чистоты поверхности подложек. АС № 2380684 от 16.10.2008.