

# Современные методы удаления загрязнений с подложек в микроэлектронике

В. Леляев<sup>1</sup>

УДК 621.79.02 | ВАК 2.2.4

В процессе изготовления полупроводниковых приборов сегодня важнейшим этапом является подготовка и очистка поверхности подложек. Она необходима для обеспечения качественного и однородного процесса монтажа кристаллов или ультразвуковой микросварки, а также для предотвращения возможных дефектов в устройствах. В статье обсуждаются методы жидкостной и сухой очистки полупроводниковых подложек, особенности технологического процесса и применяемого оборудования.

Существует несколько методов очистки и подготовки поверхности подложек к последующим операциям, но перед тем как приступить к очистке, сначала нужно определить характер и источник загрязнений. В зависимости от типа взаимодействия загрязнений с поверхностью различают физическую или химическую адсорбцию. Физические загрязнения держатся на подложке за счет электростатики – сил Ван-дер-Ваальса, химические – благодаря химическим связям с поверхностью заготовки. Химические загрязнения являются необратимыми, закрепляются одним слоем и очень сложны в удалении. Из физических загрязнений наиболее тяжело поддаются очистке мелкие зерна абразива, внедренные в поверхностный слой. Поскольку характер и вид загрязнений обширен, получить идеально чистую поверхность крайне сложно. Поэтому в микроэлектронике термин «чистая поверхность» имеет относительный характер.

Технологически чистой принято считать поверхность, которая характеризуется концентрацией сторонних примесей, не препятствующей воспроизводимому получению заданных значений и стабильности параметров ИМС.

Классификация существующих методов удаления загрязнений с подложек показана на рис. 1. Основной фокус в статье сделан на сухих методах очистки с применением плазмы.

Жидкостные методы очистки включают в себя обезжиривание в органических растворителях или мыльных растворах, химическое и электрохимическое травление, промывание водой.

Сухие методы очистки, такие как термический отжиг, газовое, ионное и плазмохимическое травление,

являются более щадящими для большинства чувствительных изделий, но каждый метод удаления загрязнений имеет свои преимущества и недостатки. Рассмотрим жидкостные и сухие методы очистки более подробно.

## ЖИДКОСТНЫЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ

Жидкостная очистка подразумевает использование водных и других растворов и реактивов. Основой метода является перевод поверхности основания из гидрофобного состояния в гидрофильное, что позволяет эффективно удалять определенные жировые загрязнения. Очевидным недостатком метода является необходимость использования химических реагентов, зачастую дорогостоящих, а также применения технологически сложного оборудования, если речь идет о химических методах удаления загрязнений.

Технологически первым этапом является обезжиривание, как для физической, так и для химической очистки. Физический процесс основан на отрыве молекул жира от поверхности при ее взаимодействии с органическими растворителями. Наиболее неприятным эффектом здесь является то, что после отрыва от поверхности жировые молекулы равномерно распределяются по поверхности ванны, где производится обезжиривание, и возможна обратная их адсорбция основанием. Для того чтобы этого избежать, нужно постоянно обновлять концентрацию растворителя.

При выборе обезжиривающего состава для химического процесса необходимо учитывать, что большинство органических растворителей неполярны, они растворяют только неполярные органические загрязнения. Поэтому вначале неполярными или слабо полярными растворителями (бензолом, толуолом, четыреххлористым углеродом) удаляют неполярные загрязнения (парафины, вазелины, минеральные масла). Затем ацетоном,

<sup>1</sup> Компания «Глобал Микроэлектроника», руководитель направления, VL@global-micro.ru.

спиртами, трихлорэтиленом и другими полярными растворителями удаляют полярные загрязнения (жиры, белки, следы поверхностно активных веществ – ПАВ). Для интенсивного одновременного удаления полярных и неполярных органических загрязнений в промышленном производстве широко применяют смеси различных растворителей. Также важным параметром будет являться температура, так как растворимость жиров возрастает с повышением температуры растворителя. В качестве примера можно привести наиболее часто используемый процесс жидкостной очистки кремниевых пластин – это горячий перекисно-аммиачный раствор, то есть водный раствор пергидроля  $H_2O_2$  и щелочи  $NH_4OH$  с температурой 75–80 °С. При этом будет выделяться атомарный кислород в результате разложения пергидроля.

После обезжиривания в физических процессах будет достаточно использовать промывание водой, а химический процесс далее подразумевает кислотное травление. Процесс травления пластин и подложек заключается в растворении их поверхности при взаимодействии с реагентами, другими словами при травлении происходит удаление приповерхностного слоя основания.

В случае изделий, которые не допускают контакта с жидкими средами, или невозможности использования на производстве агрессивных химических реагентов в соответствующих лабораториях решением будет применение сухих методов очистки загрязнений.

## СУХИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ

К сухим методам очистки относятся такие процессы, как отжиг, газовое травление, ионное травление (плазменная очистка), плазмохимическое травление.

Термообработка или отжиг – наиболее простой способ, который заключается в нагреве основания до температуры, при которой происходит удаление адсорбированных поверхностью загрязнений и испарение летучих соединений. Часто процесс проводится в вакуумной камере для эффективного удаления частиц загрязнений.

Газовое травление подразумевает, так же как и в химическом травлении, удаление приповерхностного слоя пластины смесью водорода или гелия с галогенами – фтор, хлор, бром, при температурах 800–1300 °С. Газовое травление, как правило, позволяет получить более чистые поверхности по сравнению с химическим травлением, но

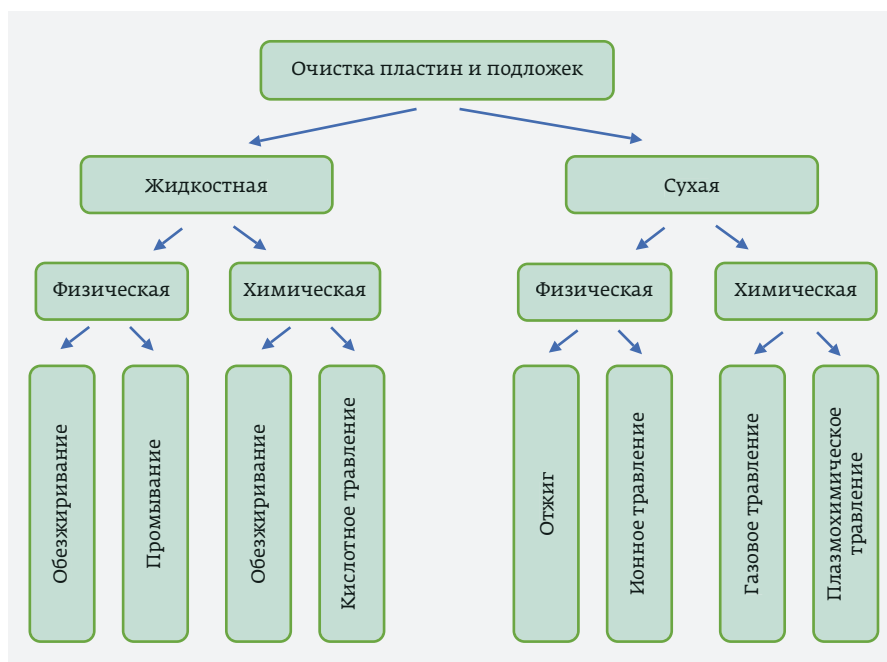
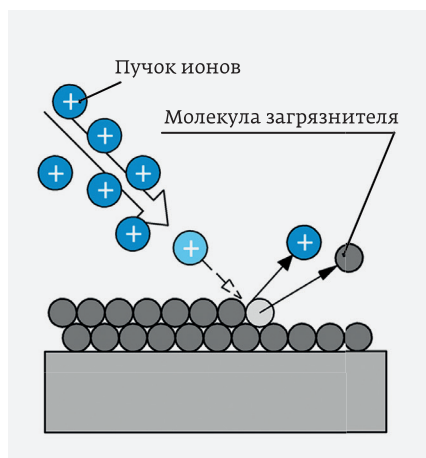


Рис. 1. Методы удаления загрязнений

его применение будет ограничено высокими температурами процесса, а также требованием к использованию особо чистых газов.

Ионное (плазменное) травление – это процесс удаления только поверхностного слоя материала бомбардировкой потоком ионов инертного газа высокой энергии. Суть процесса заключается в том, что ускоренные электрическим полем ионы при столкновении с поверхностью пластин или подложек передают их атомам свою энергию и импульс (рис. 2). Если во время соударения энергия, передаваемая атому, превышает энергию химической связи атома загрязнения в решетке, а импульс, сообщаемый атому, направлен наружу от поверхности, то происходит смещение атомов и их отрыв от поверхности. Для этого процесса необходима вакуумная среда.

Другая разновидность процесса – плазмохимическое травление. В отличие от ионного травления, этот процесс основан на разрушении обрабатываемого материала ионами активных газов, образующимися в плазме газового разряда и вступающими в химическую реакцию с атомами материала при бомбардировке поверхности с загрязнением. Технически же оба процесса – и ионное и плазмохимическое травление – могут быть упрощенно реализованы на одном и том же типе установок. Сам процесс запускается подачей на подложкодержатель отрицательного потенциала, при котором положительно заряженные ионы газа (чаще всего – аргона), вытягиваются из плазмы, ускоряются электрическим полем и механически бомбардируют загрязненное основание.



**Рис. 2.** Физический принцип ионной (плазменной) очистки

Конфигурация первых установок плазменной обработки сейчас больше характерна для систем нанесения тонких пленок. Плазма зажигалась в рабочей области, равномерность обработки была обусловлена планетарным вращением подложек. Такая конструкция эффективна, однако не позволяет обеспечить достаточно быструю обработку, которая ожидается от вспомогательного технологического процесса. Решением проблемы производительности стало применение цилиндрического типа реактора с клеткой Фарадея (рис. 3).

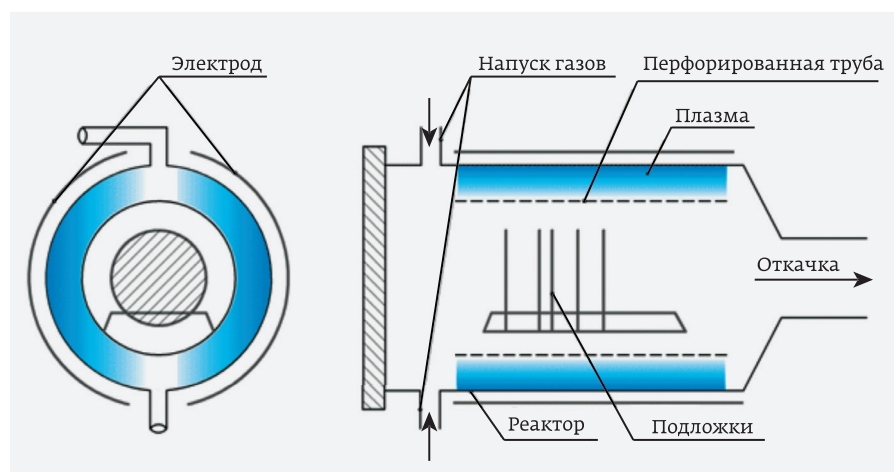
Дальнейшее развитие установок плазменной очистки привело к необходимости еще большего повышения производительности и большей загрузки рабочей камеры. Решением стали камеры прямоугольного типа с перемещаемыми полками-электродами (рис. 4).

Особенность этого типа камеры не только в том, что загрузка образцов может быть увеличена кратно, но и в управлении потоком. Так, например, располагая заземляющие и активные электроды сверху вниз последовательно (А-З-А-З), получим режим нисходящего потока, иными словами – безэлектронный режим. Образец должен быть помещен на изолированную полку под электродами. В этом режиме плазма диссоциирует на ионы и электроны между активным и заземляющим электродами. Ионы газа имеют относительно большую массу (например, атомный вес аргона равен 40), а электроны практически не имеют массы, благодаря чему электроны будут задержаны заземляющими полками, а ионы продолжат свой путь к поверхности образца (рис. 5).

Поскольку частицы ускоряются в направлении от активного электрода к заземляющему, большая масса

ионов потока подвергается минимальному отклонению, если прямой путь заставляет ион проходить через перфорации в электроде заземления. Затем эти ионы достигают поверхности и производится очистка, как было показано ранее. Однако электроны практически не имеют массы, благодаря чему оказываются притянуты к электроду заземления и не будут проходить через перфорацию в нем.

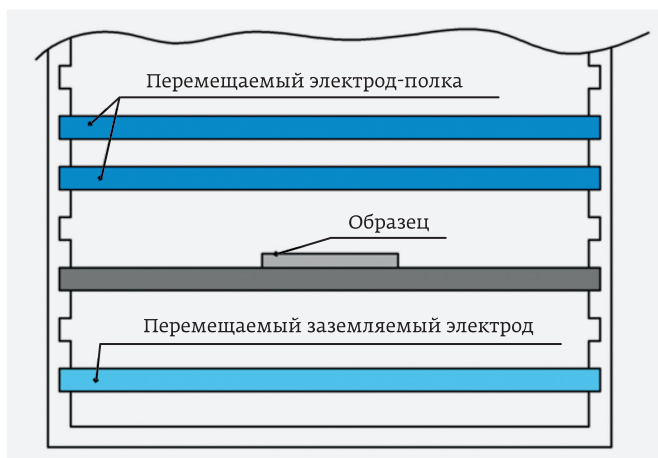
Безэлектронный режим очистки используется для поверхностей электронно-чувствительных образцов перед микросваркой. Интенсивность плазмы существенно снижается в этом режиме, поскольку большая часть ускоренных ионов попадает на землю из-за пространственной конструкции заземляющего электрода.



**Рис. 3.** Конструкция цилиндрического типа реактора

Другое использование установки плазменной обработки – это режим активной очистки, который представляет собой простую конфигурацию для образцов, которые не будут повреждены электростатическим зарядом. В этом режиме электроды монтируются в обратной последовательности (З-А-З-А и т. д.), а образцы помещаются на заземляющий электрод. Режим реактивного ионного травления похож на схему активного режима, но образцы помещаются на активные электроды вместо заземляющих. Эта конфигурация обеспечивает более агрессивную плазменную очистку, распыление происходит при более высоких уровнях энергии.

Еще одним вариантом является режим активной ионной ловушки. Электроды располагаются зеркально (З-А-А-З-А-А-З), а образец должен быть помещен в середину между ними, например, на центральный заземляющий электрод. Этот режим является наиболее агрессивным из всех режимов очистки плазмой. Ионы оказываются захваченными между парами противоположных



**Рис. 4.** Конструкция камеры с перемещаемыми полками-электродами

электродов, поскольку отсутствует движущий электрический потенциал. Накопление движущихся ионов приводит к очень агрессивной скорости травления. Однако есть и недостаток: из-за высокой энергии процесс сопровождается усиленным выделением тепла.

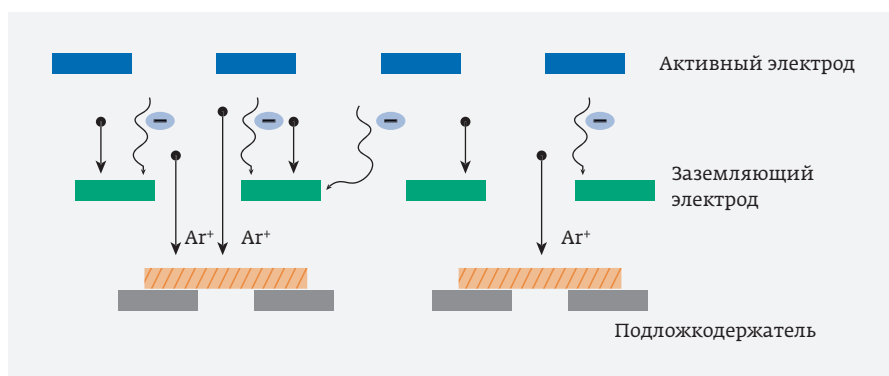
Подходя к вопросу внедрения плазменной очистки на производство, нужно ответить на три вопроса: какой тип реактора лучше использовать, каким рабочим газом будет производиться очистка и какую частоту генератора выбрать. В табл. 1 приведены различные рабочие среды для плазменной очистки.

Что касается частоты генератора, то существует два промышленных стандарта – 13,56 МГц или 100 кГц. Изначально установки низкочастотной очистки производили только малоизвестные американские компании, но за последние 10–15 лет их количество растет пропорционально запросам. На рис. 6 показана

установка плазменной очистки SH300 от корейского производителя H&J.

На текущий момент большинство компаний-производителей оборудования плазменной очистки имеет в своих линейках модели, использующие низкочастотную плазму. Считается, что для плазменной очистки более благоприятна именно низкочастотная плазма, но аргументы зачастую расплывчаты. При сравнимой скорости обработки плазма различной частоты обладает различной физикой потерь. Если в высокочастотной плазме потери выражаются в высоком тепловыделении, то в низкочастотной – в паразитных явлениях, ведущих к резкому снижению эффективности при резонансе. И если резонанса можно избежать грамотным подбором параметров, то нагрев заготовки может пагубно сказаться на чувствительных элементах топологии.

Более того, низкочастотная плазма однородна. В отличие от высокочастотной плазмы, в ней отсутствует чередование пятен. Это повышает равномерность обработки и допускает близость к электродам при обработке в безопасном режиме. Важным моментом является расстояние между электродами для возникновения разряда. Высокочастотная плазма тем эффективнее, чем больше расстояние между электродами. Для загорания низкочастотной плазмы не требуется большого расстояния, что



**Рис. 5.** Безэлектронный режим

**Таблица 1.** Рабочие среды для плазменной очистки

Газ	Тип очистки	Эффективное применение
Аргон	Ионная	Интенсивная физическая очистка
Азот	Ионная	Мягкая физическая очистка
Аргон/азот+кислород	Плазмохимическая	Химическое удаление органических загрязнителей
Аргон/азот+водород	Плазмохимическая	Химическое удаление тонких пленок оксидов металлов
Специализированные газы (пример: CF4)	Плазмохимическая	Конкретные материалы (в примере – для кремния)



Рис. 6. Установка плазменной очистки SH300 от корейского производителя H&J

позволяет увеличить полезный рабочий объем камеры и использовать несколько пар электродов при последовательной загрузке, чтобы избежать «теневого эффекта». Таким образом, низкочастотная плазма действительно является предпочтительной для очистки поверхности изделий — ее использование позволяет добиться наибольшей производительности, равномерности обработки и избежать нагрева чувствительных элементов.



Подводя итог, можно сказать, что использование плазмы является предпочтительным методом очистки подложек и изделий современной микроэлектроники, поскольку не требует дорогостоящих реактивов, специальных требований к помещению, не использует высокие температуры процесса в 800–1000 °С, не повреждает чувствительные элементы и является универсальным для большинства изделий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Ефимов И.Е., Козырь И.Я., Горбунов Ю.И.** Микроэлектроника. Физические и технологические основы. Надежность. М.: Высшая школа, 1986.
2. **Шмаков М., Паршин В., Смирнов А.** Школа производства ГПИС. Очистка поверхности пластин и подложек // Технологии в электронной промышленности, 2008. № 5.
3. **Burkman D.** Optimizing the cleaning procedure for silicon wafers prior to high temperature operations // Semiconductor International. 1981. V. 14. No. 14. Jul.
4. **Wood L., Fairfield C., Wang K.** Plasma cleaning of chip scale packages for improvement of wire bond strength // Electronic Materials and Packaging, 2000. (EMAP 2000). International Symposium on. IEEE, 2000.
5. **Корочкин И., Хриченко В.** Три кита плазменной очистки. Глобал Микроэлектроника, Москва, 2019.
6. Yield engineering services / YES G500 User Manual.

#### КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



#### ЭЛЕКТРОНИКА – ПРАКТИЧЕСКИЙ КУРС ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ, ИСПРАВЛЕННОЕ

Джонс М.Х.

В книге – переводе последнего, третьего, английского издания – рассмотрены принципы построения базовых схем современной электроники, широкого спектра как аналоговых, так и цифровых устройств. Это учебное пособие для студентов средних и высших учебных заведений радиотехнических и электронных специальностей наверняка будет полезно широкому кругу радиолюбителей.

При переводе сохранены обозначения и терминология, отличные от принятых в отечественной литературе, что может быть полезно читателям при дальнейшем изучении технической литературы стран Запада.

Для элементов, используемых в рассматриваемых примерах, указаны отечественные аналоги.

Перевод выполнен доцентами кафедры радиотехники МФТИ.

М: ТЕХНОСФЕРА, 2025. – 512 с.  
ISBN 978-5-94836-341-7

Цена 1300 руб.

#### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru), [sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)



# EXPO ELECTRONICA

МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА ЭЛЕКТРОНИКИ:  
КОМПОНЕНТЫ И ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛЫ  
И ОБОРУДОВАНИЕ, ВСТРАИВАЕМЫЕ  
СИСТЕМЫ И КОНЕЧНЫЕ РЕШЕНИЯ

**15–17.04.2025**

МОСКВА, КРОКУС ЭКСПО

**ПОСЕТИТЕ КРУПНЕЙШУЮ  
ВЫСТАВКУ ЭЛЕКТРОНИКИ!**

**ВЕКТОРЫ РАЗВИТИЯ 2025:**

EXPOСIFRA - ВЫСТАВКА  
ИНФОРМАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ И РЕШЕНИЙ  
ДЛЯ ЦИФРОВОЙ  
ТРАНСФОРМАЦИИ



СЕКТОР РОБОТОТЕХНИКИ

ПРЕМИЯ ELECTRONICA



ПОЛУЧИТЕ  
БЕСПЛАТНЫЙ БИЛЕТ  
ПО ПРОМОКОДУ

**EE2025magazine**



ОРГАНИЗАТОР  
ORGANISER