

Окончание. Начало в № 5'2008

Школа производства ГПИС.

Очистка поверхности пластин и подложек

Появление сухих методов очистки (рис. 8) было обосновано не только проблемами исключения загрязнений, но и, главным образом, необходимостью прецизионного локального травления через контактные маски при формировании топологии микросхем. В данной статье описывается сущность и особенности этих методов.

Максим Шмаков

mxm-shmakov@yandex.ru

Валерий Паршин,

К. Т. Н.

Александр Смирнов

Термообработка (отжиг)

Термообработка (ТО) применяется для удаления адсорбированных поверхностью примесей, разложения поверхностных загрязнений и испарения летучих соединений. Как правило, отжиг проводится в вакуумных и термических установках непосредственно перед процессами оксидирования, эпитаксии и др. Например, при выращивании на кремнии маскирующих пленок газы и влага удаляются с поверхности по мере нагревания пластин до температуры оксидирования. При отжиге полупроводниковых пластин в вакууме с их оксидированной поверхности уже при температуре 400 °С легко десорбируются влага, углекислый газ, легкие углеводороды. Оксидные пленки с поверхности кремния в вакууме удаляются при температурах выше 900 °С, а перед эпитаксиальным наращиванием кремниевых слоев их удаляют отжигом пластин кремния в водороде при температуре 1200–1250 °С. Финишной операцией маршрутов очистки подложек из керамики, стекла, кварца, сапфира является отжиг в вакууме. Эффективность очистки увеличивается с ростом температуры, однако температура обработки ограничена температурой плавления очищаемых материалов или диффузией легирующих примесей. В этих случаях применяют более низкотемпературные процессы очистки.

Ионное травление

Ионное травление (ИТ) — процесс удаления распылением слоя вещества с находящимися на его поверхности загрязнениями и адсорбированными газами. Травление выполняют в вакуумных установках путем бомбардировки пластин или подложек (мишеней) ускоренными положительными ионами инертных газов. Наиболее часто для распыления применяют аргон, так как он недорог, недефицитен и обеспечивает эффективное распыление. Ускоренные ионы передают кинетическую энергию поверхностным атомам либо непосредственно, либо через цепочку (или каскад) соударений приповерхностных атомов мишени. В последнем случае атомы смещаются из узлов и вдоль траектории движения иона об-

разуются зоны радиационных нарушений структуры. Распыление поверхностных атомов происходит в том случае, если их энергия превышает энергию межатомного взаимодействия в материале, подвергаемом травлению.

Травление начинается с определенных значений энергий, превышающих пороговую энергию распыления. Травление кремния выполняется при плотностях ионного тока свыше 10 А/м² и энергии ионов 1–10 кэВ. При больших энергиях ионы глубоко внедряются в кремний и распыление не наблюдается.

Эффективность распыления и, следовательно, травления характеризуется коэффициентом распыления, который численно равен количеству атомов вещества, распыленных одним бомбардирующим ионом. Коэффициент распыления S зависит от массы обрабатываемого вещества m_1 , массы m_2 , энергии E и угла падения θ иона, а также от физического состояния поверхности:

$$S = k \times m_1 \times m_2 E / [\lambda(m_1 + m_2)], \quad (2)$$

где k — коэффициент, характеризующий состояние поверхности; λ — средняя длина свободного пробега иона в обрабатываемом материале, зависящая от θ .

С увеличением угла падения ионов ($\theta = 0$ при нормальном падении) коэффициенты распыления обычно повышаются благодаря увеличению пути перемещения ионов в приповерхностном слое и, следовательно, увеличению вероятности встреч с атомами мишени. При дальнейшем повышении θ коэффициенты распыления достигают максимума, что соответствует критическому углу падения ионов, и затем начинают уменьшаться, что соответствует отражению ионов от поверхности.

Коэффициент распыления — величина среднестатистическая и может выражаться не целым числом. Значения коэффициентов распыления основных полупроводников и сапфира при $\theta = 0$ приведены в таблице 3.

Коэффициент распыления связан с массой расплавляемого вещества m [г] соотношением:

$$S = 6,02 \times 10^{23} \times m \times z_e / (A \times I_H \times t), \quad (3)$$

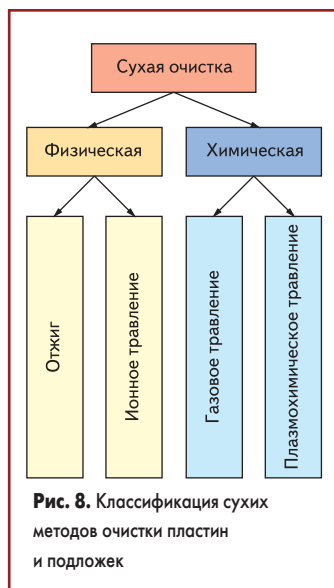


Таблица 3. Коэффициенты распыления материалов

Материал	Коэффициент распыления при энергии ионов аргона, кэВ		
	0,6	1	2
Кремний	0,5	0,6	0,9
Германий	1,2	1,5	2,0
Арсенид галлия	0,9	1,25	–
Сапфир	–	0,04	0,1

где $6,02 \times 10^{23}$ — число Авогадро, моль⁻¹; z_c — заряд иона; I_H — ток ионов, А; t — длительность бомбардировки, с; A — атомная масса вещества мишени.

В зависимости от устройства установок различают ионно-плазменное и ионно-лучевое травление.

Ионно-плазменное травление

Ионно-плазменное травление выполняют в диодных или триодных камерах вакуумных установок.

Травление в диодных камерах (рис. 9) проводят при постоянном или переменном ВЧ-напряжении. Пластины помещают на катоде, из камеры откачивают воздух и через игольчатый натекатель напускают аргон до рабочего давления.

При подаче постоянного напряжения 1–3 кВ между катодом и анодом происходит электрический пробой газа, и при определенном разрядном токе зажигается тлеющий разряд. Пространственный заряд в газоразрядном промежутке между катодом и анодом распределен неравномерно; неоднородно и распределение электрического потенциала. Визуально разряд состоит из чередующихся светящихся и темных областей: темное катодное пространство, отрицательное тлеющее свечение, фардеево темное пространство, положительный столб, темное анодное пространство. Люминесцентное свечение областей обусловлено появлением в результате неупру-

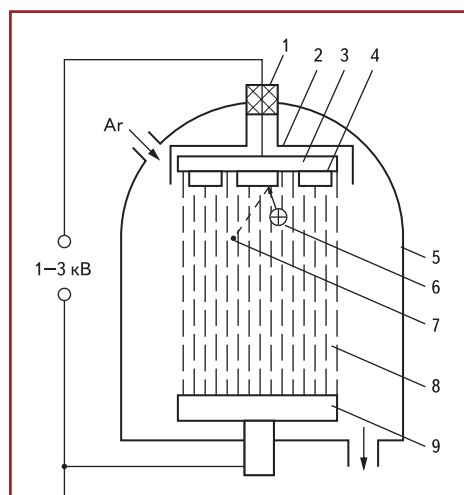


Рис. 9. Схема процесса ионно-плазменного травления в диодной вакуумной камере: 1 — изолятор; 2 — экран; 3 — катод; 4 — пластины; 5 — вакуумная камера; 6 — бомбардирующий ион аргона; 7 — частица распыленной пластины; 8 — плазма тлеющего разряда; 9 — анод

гих соударений с ускоренными электронами возбужденных атомов, которые испускают кванты света при переходе электронов на нижние свободные уровни.

Наиболее существенными для процесса травления являются темное катодное пространство и положительный столб. Основное падение напряжения между катодом и анодом приходится на прилегающую к катоду область темного катодного пространства, так как из этой области быстро в сторону анода уходят электроны, и сформированная менее подвижными заряженными частицами — ионами — она имеет низкую электропроводность.

Электрическое поле темного катодного пространства играет решающую роль как в процессе распыления (травления), так и в поддержании тлеющего разряда. Ионы, попавшие в область темного катодного пространства, ускоряются электрическим полем и бомбардируют катод. В результате бомбардировки происходит распыление пластин. При нейтрализации ионов поступающими из внешней катодной цепи электронами освобождается энергия, достаточная для вторичной электронной эмиссии. Покинувшие катод электроны в области темного катодного пространства ускоряются электрическим полем, их энергия возрастает и становится достаточной для ионизации молекул газа. Таким образом, тлеющий разряд является самостоятельным, так как он сам без вспомогательных средств обеспечивает эмиссию электронов и последующую ионизацию газа. Положительный столб выполняет функции участка проводимости между катодом и анодом. В области положительного столба электроны и ионы движутся диффузионно и их концентрации равны.

Параметры процесса ионно-плазменного травления на постоянном токе следующие: давление газа в вакуумной камере, напряжение между анодом и катодом, разрядный ток, расстояние от анода до поверхности пластин, время травления.

В диодных камерах на постоянном токе можно травить только материалы с достаточной электропроводностью (металлы, полупроводники).

При подаче переменного ВЧ-напряжения его полярность между электродами меняется каждые полпериода, то есть катод и анод как бы меняются местами. Начиная с определенной частоты, большинство электронов за полпериода не успевают дойти до положительного электрода. Они начинают колебаться в газоразрядном промежутке, приобретая энергию, достаточную для ионизации молекул газа. При этом разряд поддерживается независимо от притока вторичных электронов. Благодаря колебаниям электронов вероятность ионизирующих соударений возрастает, и поэтому процесс травления можно проводить при меньших давлениях в камере (0,1–1 Па) по сравнению с травлением на постоянном токе (0,1–1 Па).

Диодному травлению при переменном ВЧ-напряжении можно подвергать непроводящие и плохо проводящие материалы. На постоянном токе травление таких материалов затруд-

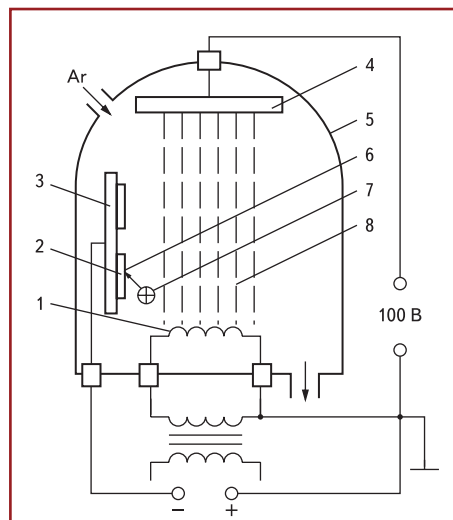


Рис. 10. Схема процесса ионно-плазменного травления в триодной вакуумной камере: 1 — термокатод; 2 — пластина; 3 — мишень; 4 — анод; 5 — вакуумная камера; 6 — частица распыленной пластины; 7 — ион аргона; 8 — плазма дугового разряда

няется, а затем и прекращается из-за накопления на них положительного заряда ионов. При отрицательной полуволне ВЧ-напряжения подложки травятся, при положительной полуволне вытягиваемые из плазмы электроны нейтрализуют накопленный на подложках положительный заряд ионов.

Недостатками обоих способов диодного ионного травления являются низкие скорости и возможность загрязнения обрабатываемых поверхностей остаточными газами.

Ионно-плазменное травление в триодных камерах (рис. 10) выполняют в плазме самостоятельного дугового разряда, который горит между анодом и катодом при более высокой степени вакуума $10^{-2} \dots 10^{-1}$ Па. Для поддержания достаточной концентрации ионов аргона при таком более низком давлении увеличивают количество ионизирующих газ электронов. Для этого используют термоэмиссионный катод. После откачивания камеры, включения тока накала катода и напуска аргона до рабочего давления между катодом и анодом зажигают дуговой разряд путем подачи напряжения 100–300 В. Образцы, подвергаемые травлению, помещают на дополнительном третьем электроде, который располагают в области положительного столба разряда (на расстоянии от катода, равном 2/3 расстояния анод – катод).

При подаче на этот электрод отрицательного смещения 1–3 кВ из плазмы газового разряда вытягиваются ионы аргона, бомбардирующие очищаемую поверхность. Благодаря термоэмиссионному катоду можно независимо управлять концентрацией и энергией ионов в плазме, так как цепи газового разряда (анод – катод) и распыления (мишень – подложка) электрически развязаны друг от друга. Концентрацию ионов можно менять, изменяя ток электронной эмиссии или ускоряющее напряжение между катодом и анодом, энергию ионов можно менять изменением потенциала мишени.

Ионно-лучевое травление

Ионно-лучевое травление выполняют в вакуумных установках, в которых луч ионов формируется специальным газоразрядным источником и системами вытягивания и ускорения ионов. Давление инертного газа в источнике (около 0,1 Па) должно быть достаточно высоким для создания газоразрядной плазмы. Для обеспечения равномерного травления по площади обрабатываемой поверхности нужно, чтобы луч ионов имел равномерное распределение плотности тока и энергии по сечению, а также был коллимированным. Луч ионов из источника направляется в рабочую камеру установки, где на вращающемся наклонном столике расположены пластины. Меняя наклон столика, можно регулировать угол падения ионов. Давление в рабочей камере должно быть существенно ниже (не более 0,04 Па), чем в источнике, чтобы предотвратить рассеяние ионного луча и загрязнение очищаемых пластин.

Для компенсации положительного заряда, накапливаемого на обрабатываемых поверхностях, применяют нейтрализатор — подогревный катод, эмиттирующий электроны (рис. 11).

При ионно-лучевом травлении мишени расположены вне плазмы газового разряда. Это позволяет регулировать параметры процесса, энергию ионов, плотность тока ионного луча и угол падения ионов на обрабатываемую поверхность независимо друг от друга.

Особенности ионного травления:

- универсальность, то есть возможность очищать от загрязнений любого вида и травить поверхности любых материалов;

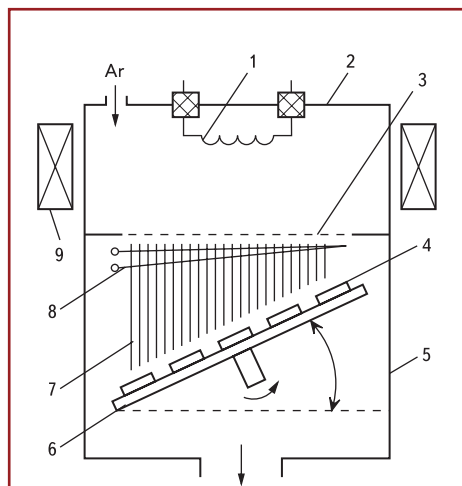


Рис. 11. Схема установки для ионно-лучевого травления:

- 1 — термокатод;
- 2 — разрядная камера источника ионов — анод;
- 3 — смещаемые сетки для вытягивания ионов;
- 4 — пластины (подложки);
- 5 — рабочая камера;
- 6 — подложкодержатель;
- 7 — ионный луч;
- 8 — нейтрализатор;
- 9 — соленоид

- низкая избирательность травления различных материалов из-за чисто физического механизма процесса распыления; это затрудняет локальную обработку, так как материал контактной маски тоже травится (распыляется), а с другой стороны — позволяет применять ионное травление для обработки многослойных пленок с несовместимыми с точки зрения жидкостного травления свойствами слоев.

Достоинства ионного травления:

- преимущественное травление в направлении нормали к поверхности, что обеспечивает хорошие результаты при локальной обработке, так как практически отсутствует боковая составляющая скорости травления;
 - безынерционность, процесс травления прекращается сразу же после снятия с образцов потенциала.
- Недостатки ионного травления:
- низкие скорости травления (0,1–1 нм/с);
 - значительные радиационные и тепловые воздействия, вызывающие разрушения контактных масок, деградацию электрофизических параметров структур и необходимость охлаждения образцов при травлении.

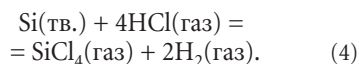
Газовое травление

Сущность процесса газового травления (ГТ) заключается в химическом взаимодействии обрабатываемого материала с газообразным веществом и образовании при этом легко удаляемых летучих соединений. Загрязнения при ГТ удаляются вместе с поверхностным слоем пластин или подложек.

В качестве газов-реактивов для травления кремниевых пластин можно применять галогены, галогеноводороды, соединения серы, пары воды. Небольшие количества этих газов добавляют к газу-носителю (водороду или гелию) и транспортируют в камеру установки.

Травление кремния хлористым водородом

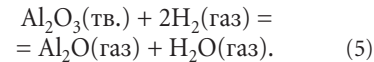
Травление кремния хлористым водородом широко используется перед выращиванием на пластинах кремниевых слоев:



Пары хлористого водорода доставляются водородом в реакционную камеру установки эпитаксиального наращивания, где расположены кремниевые пластины, нагретые до температуры 1150–1250 °С.

Газовое травление сапфира водородом

ГТ сапфира водородом, в отличие от жидкостного, позволяет получать поверхность подложек, свободную от механически нарушенного слоя и от микропримесей, что очень важно для последующего выращивания на них слоев кремния. Травление сапфира сопровождается химической реакцией:



В диапазоне температур 1200–1600 °С травление сапфира водородом полирующее.

Газовое травление по сравнению с жидкостным позволяет получать более чистые поверхности. Во многих случаях газовое травление имеет ограниченное применение из-за высоких температур обработки и необходимости использования особо чистых газов. Однако в тех случаях, когда газовое травление совместимо с последующим процессом (например, с выращиванием на кремниевых пластинах кремниевых слоев), его применение целесообразно.

Плазмохимическое травление

Плазмохимическое травление (ПХТ), как и ионное, проводят в вакуумных установках и также используют плазму газового разряда. ПХТ (в отличие от чисто физического распыления при ионном травлении) имеет химическую природу. Оно основано на использовании обладающих большой реакционной способностью химически активных частиц, получаемых в плазме газового разряда.

Процесс ПХТ можно разделить на ряд этапов:

- 1) доставка плазмообразующего газа, пара или смеси в камеру вакуумной установки;
- 2) образование химически активных частиц в газовом разряде;
- 3) доставка их к обрабатываемой поверхности;
- 4) химические реакции с образованием легко летучих соединений;
- 5) десорбция и удаление образующихся летучих соединений через откачную систему вакуумной установки.

Плазмообразующие газы выбирают исходя из свойств обрабатываемого материала. Для травления кремния и некоторых металлов применяют галогеносодержащие молекулярные газы, так как именно в их плазме образуются необходимые химически активные частицы, переводящие поверхностные слои в летучие соединения. Для разбавления и обеспечения требуемых параметров травления в плазму дополнительно вводят аргон, кислород, азот. Присутствие кислорода повышает скорость травления и качество очистки. В плазме химически активные частицы образуются в результате взаимодействия молекул газа с ускоренными электронами, которые в отличие от тяжелых частиц обладают существенно большими энергиями.

Присутствие в плазме кислорода способствует очистке поверхности от углерода за счет его окисления до CO или CO₂. Атомарный кислород также очищает поверхность от органических загрязнений. При плазмохимическом травлении физическое распыление практически отсутствует, так как энергия ионов не превышает 100 эВ.

В зависимости от конструкции установок различают плазменное и радикальное плазмохимическое травление.

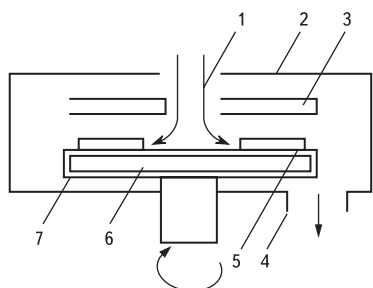


Рис. 12. Схема вакуумной камеры диодного типа для плазмохимического травления непосредственно в плазме:

- 1 — подача рабочего газа;
- 2 — вакуумная камера;
- 3 — электрод;
- 4 — откатный патрубок;
- 5 — пластина (подложка);
- 6 — подложкодержатель;
- 7 — изоляционное покрытие

Плазменное травление

Плазменное травление осуществляют непосредственно в плазме ГТ, то есть с участием всех химически активных частиц, как с большим, так и с малым временем жизни. В камерах диодного типа (рис. 12) пластины кремния помещают на нижнем медленно вращающемся электроде. Пластины электрически изолированы от электрода, чтобы исключить ионную бомбардировку.

Радикальное плазмохимическое травление

Радикальное плазмохимическое травление проводят в области вакуумной камеры, отделенной от плазмы газового разряда перфорированным металлическим экраном (рис. 13) или магнитными электрическими полями. ВЧ-плазма возбуждается между цилиндрическими поверхностями рабочей камеры и экрана. Травление осуществляется только нейтральными электрически активными частицами с большим временем жизни, проникающими из плазмы в зону расположения пластин. Заряженные частицы плазмы не могут попасть к поверхности пластин через отверстия цилиндрического экрана. В зоне, свободной от заряженных частиц, возбужденные атомы фтора и атомарный кислород, многократно соударяясь с молекулами рабочего газа, движутся разупорядоченно, что обеспечивает высокую однородность травления от пластины к пластине и по площади каждой пластины.

Так как возбужденные атомы и свободные радикалы отличаются высокой реакционной способностью, то эффективность травления существенно повышается. По сравнению с ионным травлением при одинаковых параметрах разряда скорость возрастает более чем на порядок. Благодаря электрической активации газов плазмохимическое травление проводится при существенно меньших температурах (100–300 °С) по сравнению с обычным газовым травлением. Плазмохимическое травление из-за химического механизма обладает высокой избирательностью относительно различных материалов.

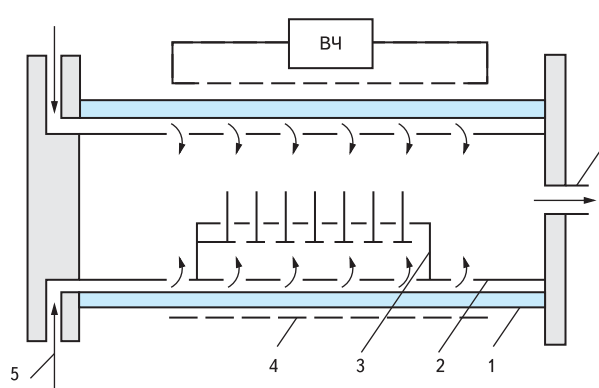


Рис. 13. Схема вакуумной камеры для радикального плазмохимического травления:

- 1 — кварцевая камера; 2 — перфорированный цилиндр; 3 — кассета с пластинами (подложками);
- 4 — ВЧ-индуктор; 5 — подача рабочего газа; 6 — откатный патрубок

Благодаря невысокой энергии частиц, поступающих на обрабатываемую поверхность, радиационные дефекты незначительны.

Химический механизм травления обуславливает наличие боковой скорости травления, что является недостатком при локальной обработке. К недостаткам плазмохимического травления можно также отнести:

- ограниченное количество соединений для получения в плазме химически активных частиц, обеспечивающих образование летучих веществ;
- сложность химических реакций, протекающих в плазме и на обрабатываемой поверхности;
- большое число взаимосвязанных технологических и конструктивных параметров.

Реактивное ионное травление

Реактивное ионное травление (РИТ) (называемое также ионно-химическим) по механизму процесса является комбинированным методом. Удаление обрабатываемого материала происходит в результате его распыления ускоренными ионами и образования легколетучих соединений при взаимодействии с химически активными частицами плазмы. От плазмохимического травления оно отличается тем, что энергия ионов больше и достаточна для распыления, а от ионного травления — тем, что используется не инертная, а содержащая химически активные частицы плазма. При этом физическое распыление интенсифицирует химические реакции, а химические реакции, ослабляя межатомные связи на обрабатываемой поверхности, увеличивают скорости распыления.

По аналогии с ионным и плазмохимическим травлением реактивное ионное травление можно выполнять при расположении обрабатываемых пластин (подложек) в плазме газового разряда (реактивное ионно-плазменное травление) или в вакууме и подвергать воздействию пучка ионов, полученных в автономно расположенном источнике (реактивное ионно-лучевое травление). Для реактивного ионно-плазменного и ионно-лучевого травления применяют те же рабочие газы, что и для плазмохимического травления.

Оборудование для реактивного ионно-плазменного травления аналогично установкам ионно-плазменного травления. Пластины располагают на электроде, не изолированном от нижнего электрода (рис. 9). Реактивное ионно-лучевое травление выполняют в вакуумных установках, аналогичных установкам для ионно-лучевого травления (рис. 11).

Благодаря химическим реакциям РИТ (и плазменное, и лучевое) обладает по сравнению с ИЛТ большими скоростями (в 3–15 раз) и избирательностью травления (в 2–10 раз), а по сравнению с ПХТ меньшими скоростью травления (в 2–3 раза) и боковой составляющей скорости при локальном травлении. Для уменьшения радиационных дефектов обрабатываемых образцов процессы травления проводят в режимах, обеспечивающих превышение скорости удаления слоев за счет химических реакций над скоростями распространения дефектов, образующихся вследствие ионной бомбардировки.

Заключение

Жидкостные методы очистки не всегда позволяют получать поверхность, свободную от органических растворителей, химических реагентов, пленок сложного состава, не взаимодействующих с растворителями. Поскольку состав загрязнений большей частью неизвестен, очистка поверхности в вакууме имеет ряд преимуществ перед жидкостными методами и в настоящее время является наиболее часто применяемой и перспективной.

Литература

1. Малышева Н. А. Технология производства микроэлектронных устройств. М.: Высшая школа, 1991.
2. Энциклопедия машиностроения. Т. 8: Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении / Под ред. Ю. В. Панфилова. М.: Машиностроение, 2000.
3. Блохин В. Г. Технологии производства микроэлектронной аппаратуры: Лекции. М.: РГТУ-МАТИ им. К. Э. Циолковского, 2004–2005.