

Школа производства ГПИС. Фотолитография.

Третий этап – передача рисунка на материал интегральной микросхемы

Передача рисунка материала интегральной микросхемы (ИМС) является заключительным этапом процесса фотолитографии (ФЛ).

Максим Шмаков

mxxm-shmakov@yandex.ru

Валерий Паршин,
к. т. н.

Данный этап состоит из 2 операций (рис. 1):

- удаление материала микросхемы (через проявленный фоторезист (ФР));
- удаление резистивной маски.

Удаление материала микросхемы (травление технологического слоя) через маску в слое фоторезиста (ФР) бывает двух видов (рис. 2), каждый из которых делится на «подвиды»:

- жидкостное;
- сухое (плазменное или ионно-плазменное).

Жидкостное травление

Основными параметрами режима травления, от которых зависят как его скорость, так и воспроизводимость размеров получаемых рельефов, являются:

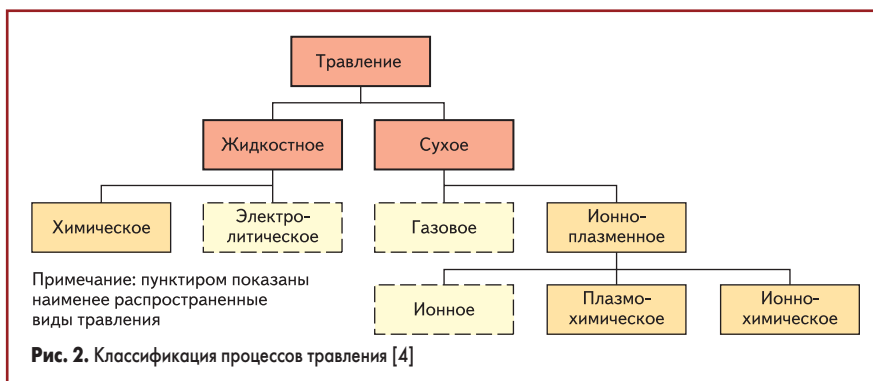
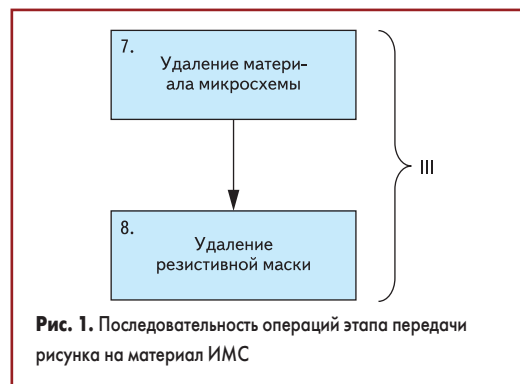
- температура;
- концентрация травителя;
- время травления.

Так, с повышением концентрации травильной смеси и температуры скорость травления растет. Увеличение времени травления приводит к боковому подтравливанию рисунка, причиной которого может быть также рост температуры травителя [1].

При травлении в жидких травителях используют водные растворы неорганических соединений (обычно кислот). Химический состав и концентрация травителя в растворе подбирается так, чтобы поверхностный слой растворялся активно, а низлежащий не растворялся. С травлением в жидких травителях связано не только явление подтравливания под фотомаску, но и разброс величины подтравливания в совокупности элементов одного слоя.

К моменту окончания растворения слоя в «окне» фотомаски боковое травление оказывается примерно равным толщине слоя (рис. 3), однако его окончание зависит от размеров вытравливаемого элемента («окна» в маске). В процессе травления возможны отвод продуктов химической реакции от поверхности в раствор и подвод из раствора свежего травителя. Оба процесса протекают благодаря взаимодиффузии, скорость которой и определяет скорость травления. В мелких элементах массообмен затруднен и скорость травления ниже, чем в крупных элементах. Поскольку технологическое время травления устанавливается по самому мелкому элементу, более крупные элементы получают «перетрав», то есть большие погрешности размера.

Точность травления повышается, то есть уменьшается разброс размеров элементов из-за раствора,



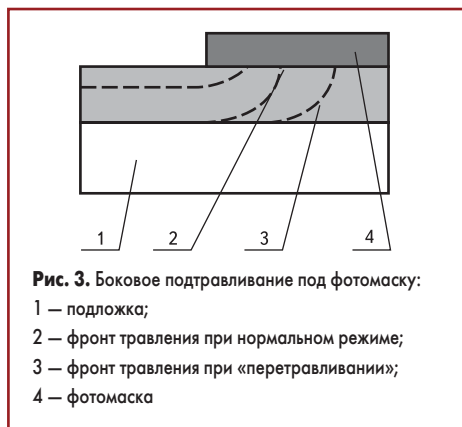


Рис. 3. Боковое подравливание под фотомаску:
1 — подложка;
2 — фронт травления при нормальном режиме;
3 — фронт травления при «перетравливании»;
4 — фотомаска

при динамическом воздействии травителя на обрабатываемую поверхность.

Для получения устойчивых результатов необходимо в процессе жидкостного травления обеспечить термостатирование травильного раствора с отклонением не более $\pm(1-2)^\circ\text{C}$ и перемешивание раствора для исключения концентрационных и маскирующих эффектов. С целью уменьшения этих эффектов подложки в травильных ваннах помещают в вертикальном положении и осуществляют их возвратно-поступательное движение в вертикальной плоскости [2].

Конечный результат травления — конфигурация вытравленного профиля элементов схемы — определяется:

- предисторией формирования защитной фоторезистивной пленки (вязкость, чистота, качество нанесения и т. д.);
 - адгезией пленки ФР к поверхности либо напыленной сплошной структуры (этап 1 ФЛ), либо коммутации и подложки (этап 2 ФЛ) (степень загрязненности поверхности под ФР, правильно выбранный режим термообработки пленки на этапах «сушка», «дублирование»);
 - геометрией вытравливаемых элементов (влияние «клина» проявления на ширину «узких» элементов);
 - «клином» проявления.
- Кроме того, протекание процесса травления, геометрические размеры вытравленных элементов схемы будут определяться:
- типом выбранного травителя;
 - температурой травителя;
 - типом материала слоев;
 - степенью смачиваемости травителем травимых поверхностей (введение смачивателя в состав травителя);
 - толщиной слоев в напыленной структуре, ее разбросом.

Применение травителей, ведущих к образованию газообразных продуктов реакции, нежелательно, так как образующиеся пузырьки газа приводят либо к локальному маскированию травления технологических слоев, либо к отрыву пленки ФР.

Качество рисунка можно улучшить, повышая температуру второй сушки ФР, но при этом приходится учитывать возможности оплавления ФР по краю изображения, в результате чего мелкие элементы не вытравливаются. Решать проблему качества травления следует, подбирая оптимальное сочетание типов

Таблица 1. Составы травителей хрома

Состав	Раствор			
	1	2	3	4
Вода дистиллированная	1	50	—	1
Кислота соляная (HCl), d = 1,19	1	—	1	1
Кислота серная (H ₂ SO ₄), d = 1,84	1	—	—	—
Калий железосинеродистый	—	25	—	—
Калий едкий	—	2,8	—	—
Глицерин	—	—	1	—
Примечания	T = 60–70 °C t _{ТРАВ.} = 40...75 с	T = 20–25 °C t _{ТРАВ.} = 240...300 с	T = 60–70 °C Подтравы минимальны	T = 60–70 °C t _{ТРАВ.} = 40 с

Таблица 2. Составы травильных растворов для удаления алюминия

Состав	Раствор				
	1	2	3	4	5
Вода дистиллированная	50	4	1	0,5	—
Ангидрид хромовый (CrO ₃), d = 1,8	7	4	—	—	—
Кислота фтористоводородная	1	3	—	—	—
Кислота ортофосфорная (H ₃ PO ₄), d = 1,4	—	—	6	8	62,5
Кислота азотная (HNO ₃), d = 1,42	—	—	—	0,3	6,5
Спирт изопропиловый ((CH ₃) ₂ CHOH), d = 1,42	—	—	1,5	—	—
Кислота уксусная (CH ₃ COOH), d = 1,050	—	—	—	1,2	31
Примечания	T = 20–25 °C t _{ТРАВ.} = 60...90 с – для толщин 0,8...1 мкм 90...180 с – для толщин > 1 мкм	T = 65–70 °C HNO ₃ для однородности травления	T = 55–65 °C Скорость травления 1 мкм/мин	T = 50–55 °C В указанном составе раствора травится и адгезионный слой ванодия	T = 40–45 °C В указанном составе раствора травится и адгезионный слой ванодия

Таблица 3. Составы травильных растворов для удаления меди

Состав	Раствор		
	1	2	3
Вода дистиллированная	10	5	2,5
Ангидрид хромовый (CrO ₃), d = 1,8	9	1,5	—
Кислота серная (H ₂ SO ₄), d = 1,84	1	—	—
Кислота соляная (HCl), d = 1,19	—	1	—
Кислота азотная (HNO ₃), d = 1,42	—	3,5	1,7
Кислота ортофосфорная (H ₃ PO ₄), d = 1,4	—	—	1,7
Кислота уксусная (CH ₃ COOH), d = 1,050	—	—	6,6
Примечания	Толщина 1,5–2 мкм T = 20–25 °C	Толщина 3–4 мкм T = 20–25 °C	T = 30 °C Подтрав минимален

ФР, травителя и подложки. Особенно сильно качество травления зависит от характеристик низлежащих слоев, а поскольку они связаны с другими технологическими процессами (ТП), то от степени отработанности технологии в целом. Конечно, и на стадиях, предшествующих травлению, характеристики подложек играют важную роль, так изменение режимов напыления алюминиевых пленок приводит к колебаниям отражательной способности подложек, а следовательно, и к изменению условий экспонирования; окисление поверхности алюминия может вызвать плохое смачивание, приводящее к скатыванию ФР при его нанесении на подложку.

Составы травителей некоторых тонкопленочных напыленных слоев

Травление хрома

Пленки хрома химически очень устойчивы из-за наличия на их поверхности тончайшего слоя оксида хрома (Cr₂O₃), который препятствует доступу кислоты к металлу. Хром в ряду напряжений стоит между цинком и железом и легко растворяется в соляной кислоте. Оксид хрома растворяется в соляной кислоте

при нагревании (60–70 °C). Этот процесс осуществляют соприкосновением поверхности хрома, находящейся в растворе, с металлом (алюминием, цинком). Обычно используют 12–16%-ный раствор соляной кислоты или насыщенный раствор AlCl₃, нагретый до 70 °C, а для иницирования реакции — алюминиевую проволоку. Реакции интенсивно протекают в месте соприкосновения, а на удаленных участках наблюдается недотравливание. Для улучшения равномерности травления добавляют поверхностно-активные вещества [3].

В таблице 1 приведены составы некоторых травителей хрома.

Травление алюминия

Алюминий травится ортофосфорной кислотой или смесью ортофосфорной, уксусной, азотной кислот и воды. Первая имеет большую вязкость, поэтому удаление пузырьков водорода, образующихся в процессе травления, затруднено. Удалять же их необходимо, для того чтобы не оставались непротравливаемые участки. Из-за повышенной вязкости скорость травления ограничена диффузией молекул травителя и, следовательно, зависит от толщины слоя алюминия. При увеличении толщины

Таблица 4. Составы травильных растворов для удаления некоторых резистивных слоев

Состав	Марки слоев		
	РС-3710	РС-5000 РС-5402	К50-С (кермет)
Вода дистиллированная	6	25	15
Кислота азотная (HNO ₃), d = 1,42	3	16	–
Кислота фтористоводородная, d = 1,12	1	4	3
Кислота соляная (HCl), d = 1,19	–	–	5
Аммоний фтористый (насыщенный раствор)	–	–	1
Примечания	T = 20–25 °C t _{ТРАВ.} = 15...20 с	T = 20–25 °C	T = 20–25 °C

слоя от 0,3–0,8 мкм до 1,2–1,6 мкм скорость травления снижается от 25 до 12,5 мкм/ч, что может быть связано с изменением структуры пленок. Уменьшить вредное влияние вязкости травителя можно, создавая вибрацию частотой 30–50 Гц с малой амплитудой. Скорость травления при этом возрастает, а ее зависимость от толщины слоя ослабевает. Применяют разные составы травителей: для тонких пленок алюминия (не толще 1,6 мкм) — 45%-ный раствор ортофосфорной кислоты при 60 °C; для толстых пленок (5–10 мкм) — ортофосфорную кислоту (1,73 г/см³), изопропиловый спирт, воду в отношении 6:1,5:1 при 60 °C [2].

Примеры травильных растворов, применяемых для удаления алюминия, приведены в таблице 2.

Травление меди

Медь травят в хлорном железе, разбавленном в азотной кислоте (HNO₃:H₂O = 2:1). Или в составах, аналогичных используемым для травления алюминия [2].

Примеры травильных растворов, применяемых для удаления меди приведены, в таблице 3.

Травление ванадия

Для травления ванадия применяют травители состава HNO₃:H₂O = 3:2 (T = 20–25 °C).

Травление резистивных слоев

Примеры травильных растворов применяемых для удаления некоторых резистивных слоев приведены в таблице 4.

Несмотря на широкое использование, химические жидкостные методы обработки (травление технологических слоев и удаление ФР) имеют ряд недостатков, основными из которых являются невысокая разрешающая способность и изотропность травления, трудность их автоматизации и появление загрязнений на поверхности подложек, что ограничивает возможности фотолитографии (ФЛ) [1].

При изготовлении ИС высокой степени интеграции, размеры элементов которых достигают долей микрометра, жидкостные методы травления не могут быть использованы из-за их недостатков. Более эффективны при этом «сухие» методы обработки, основанные на взаимодействии газоразрядной плазмы с поверхностным слоем подложек.

Газовое травление применяется довольно редко в связи со сложностью технологического процесса и высоких температур, поэтому далее рассматривается только плазменное травление.

Плазменное травление

Под термином «плазменное травление» понимают процесс контролируемого удаления материала с поверхности подложек под воздействием ионов низкотемпературной плазмы в среде инертных газов или в среде, содержащей активные газы [2].

При «сухих» методах существенно уменьшено боковое подтравливание, характерное для химического жидкостного травления (рис. 4а), поэтому клин травления уменьшается и вертикальный профиль рельефного рисунка элементов приближается к идеальному (рис. 4 б–г). Кроме того, «сухое» травление слабо зависит от адгезии защитной маски ФР к подложкам, которые после обработки не требуют операций промывки и сушки. При соответствующем подборе режимов и рабочих сред оно обладает высокой степенью анизотропии и селективности.

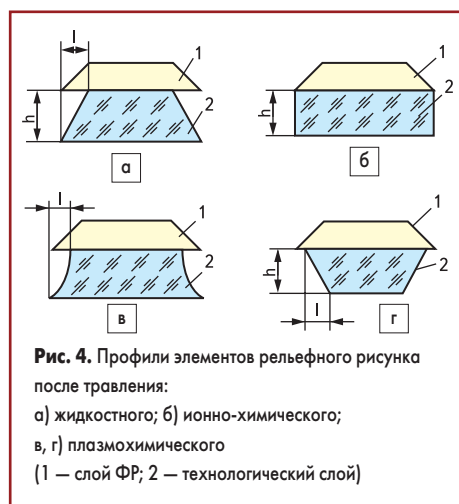


Рис. 4. Профили элементов рельефного рисунка после травления: а) жидкостного; б) ионно-химического; в, г) плазмохимического (1 — слой ФР; 2 — технологический слой)

Плазма представляет собой ионизированный газ, состоящий из почти равных количеств положительно и отрицательно заряженных частиц. В методах плазменного травления используют слабоионизированные газы, получаемые с помощью электрических разрядов при низких давлениях. Неупругие столкновения молекул газа с электронами, разогнанными электрическим полем, приводят к образованию ионов и свободных радикалов, которые могут вызвать травление за счет физических и химических взаимодействий с обрабатываемыми поверхностями. В зависимости от сочетания давления и энергии ионов плазмы характер процессов может меняться от чисто физического (распыление) до чисто химического (травление).

Распыление представляет собой физический процесс, в котором ионы плазмы ускоря-

ются электрическим полем и ударяются о поверхность твердого вещества. Энергия ионов передается атомам поверхности, выбивая и переводя их в газовую фазу. Явление физического распыления лежит в основе двух методов травления с помощью плазмы:

- ионно-плазменного;
- ионно-лучевого.

Для получения практически приемлемых скоростей травления, то есть для обработки поверхности достаточно большим количеством ионов, указанные процессы следует проводить при относительно низких давлениях (0,1–10 Па). Ионам надо сообщать энергию 0,5–10 кэВ. При меньших энергиях распыления не происходит, при больших ионы внедряются в обрабатываемый материал и распыление прекращается.

Существует метод чисто химического плазменного травления: электрический разряд в газе создает активные свободные радикалы, которые вступают в химическую реакцию с загрязнениями и веществом подложки, образуя летучие продукты. Обычно это происходит при более высоких давлениях, чем при физических способах травления. Данный метод более подробно будет рассмотрен далее.

Между крайними вариантами процесса — физическим распылением и плазмохимическим травлением — существует широкий спектр различных состояний плазмы и характера процессов ее взаимодействия с поверхностью подложки. Так, в частности, отчетливо выделяют промежуточный процесс ионно-химического (реактивного) травления (рис. 5). Это означает, что между физическими и химическими методами травления нет четкой границы. В общем случае при плазменном травлении могут совместно действовать оба механизма. При замене инертных газов в плазме на химически активные соединения, повышении давления и снижении средней энергии плазмы химическое травление усиливается, а физическое ослабевает.

В микрофотолитографии используются три метода плазменного травления:

- ионно-лучевого;
- ионно-плазменного;
- плазмохимического.

Несмотря на такое большое разнообразие, все процессы плазменного травления по механизму взаимодействия с обрабатываемым материалом можно отнести к следующим типам:

- спонтанное химическое травление;
- физическое распыление;
- радиационно-возбуждаемое химическое травление;
- радиационно-стимулированное химическое травление.

Спонтанное химическое травление

Спонтанные (самопроизвольные) химические реакции с участием химически активных частиц (ХАЧ) вносят основной вклад в удаление материала. К ним относятся все процессы (рис. 5), кроме ионно-плазменного (ИПТ) и ионно-лучевого (ИЛТ), в кото-

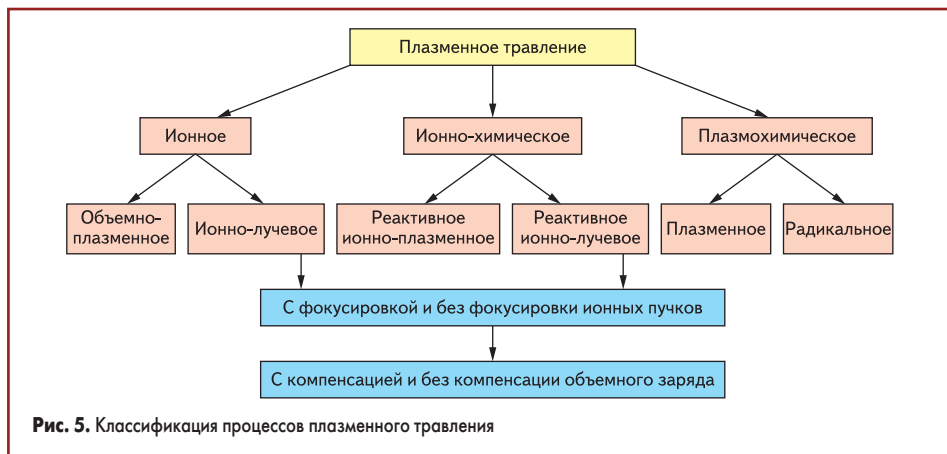


Рис. 5. Классификация процессов плазменного травления

рых радиационная стимуляция и физическое распыление не повышают заметно скорость травления.

Необходимым условием для спонтанного травления материала является образование в результате химической реакции хотя бы одного летучего и стабильного (при температуре и давлении процесса) продукта (соединения). Термин «летучий» означает, что давление паров образующегося продукта должно быть достаточно высоким, чтобы он самопроизвольно испарялся с поверхности материала. Спонтанное химическое травление включает следующие основные стадии:

- 1) доставку ХАЧ к поверхности обрабатываемого материала;
- 2) адсорбцию ХАЧ на поверхности материала;
- 3) диффузию адсорбированных ХАЧ через адсорбционный слой реагентов и продуктов реакции к атомам (молекулам) материала;
- 4) взаимодействие ХАЧ с атомами материала с образованием летучих и стабильных продуктов реакции;
- 5) десорбцию продуктов травления с поверхности в газовую фазу;
- 6) отвод продуктов травления с поверхности из газовой фазы реакционной зоны.

Физическое распыление

При этом процессе не происходят химические реакции, скорость травления материала определяется только процессом удаления атомов ионной бомбардировкой. К такому типу травления относятся процессы ИПТ и ИЛТ, в которых активные частицы не способны проводить химическую модификацию поверхности обрабатываемого материала.

Экспериментальные и теоретические исследования доказывают, что механизм физического (ионного) распыления связан с передачей кинетической энергии (импульса) бомбардирующей частицы атомам материала за счет столкновений и приводит к прямому их выбиванию из равновесных положений. Он является доминирующим в том диапазоне энергий бомбардирующих частиц, где ядерное торможение частиц в материале мишени значительно больше электронного. Для тяжелых бомбардирующих частиц (ионов, атомов, молекул и нейтронов) это условие всегда выполняется в диапазоне энергий 0,1–1,0 кэВ, характерном для процессов ИПТ и ИЛТ.

Радиационно-возбуждаемое химическое травление

При этом процессе удаление материала происходит не с помощью спонтанных реакций травления, а за счет возбуждаемых радиационной стимуляцией химических реакций (доля физического распыления мала). К такому виду травления относятся реактивное ионно-плазменное (РИПТ) и реактивное ионно-лучевое (РИЛТ), в которых нейтральные газовые частицы спонтанно не обрабатывают материал.

В этом случае радиационное воздействие (РВ) само возбуждает химические реакции, и его параметры (вид, энергия, интенсивность, пространственное распределение) непосредственно определяют характеристики травления.

Радиационно-стимулированное химическое травление

Спонтанные химические реакции вносят существенный вклад в удаление материала. РВ в результате стимуляции химических реакций значительно увеличивает скорость травления, доля физического распыления мала. К такому виду относятся процессы плазменного травления (ПТ) — РИПТ и РИЛТ, в которых нейтральные газовые частицы спонтанно обрабатывают материал.

В этом случае роль РВ заключается в стимулировании (активировании) спонтанных химических реакций.

Виды плазменного травления, применяемые при производстве ГПС

Ионное травление

В зависимости от способа получения ионов и среды, в которой находятся образцы, ионное травление разделяется на два вида:

- ионно-плазменное;
- ионно-лучевое.

При ионно-плазменном травлении образцы, закрепленные на катоде газоразрядного устройства, подвергаются бомбардировке ионами инертного газа (обычно ионами Ar) из области плазмы (рис. 6). Все остальные части реактора заземлены и являются анодом. Площадь катода намного меньше площади анода, поэтому плазма занимает весь объем реактора, а наибольшее падение напряжения приходится на область разряда



Рис. 6. Высоочастотная диодная система ионного и ионно-химического травления: 1 — подложка; 2 — катод; 3 — заземленный экран; 4 — источник ВЧ-напряжения

вблизи катода. Экран предотвращает распыление с защищаемых им участков поверхности катода.

При ионно-лучевом травлении образцы помещают в высоковакуумную камеру установки и подвергают бомбардировке ионами из автономного источника (рис. 7). Ионы могут быть получены в виде сфокусированного пучка. Для формирования ионного луча служит система вытягивающих, ускоряющих и фокусирующих линз. Для компенсации положительного заряда, накопленного на обрабатываемых поверхностях, применяют подогреваемый катод, эмитирующий электроны (нейтрализатор).

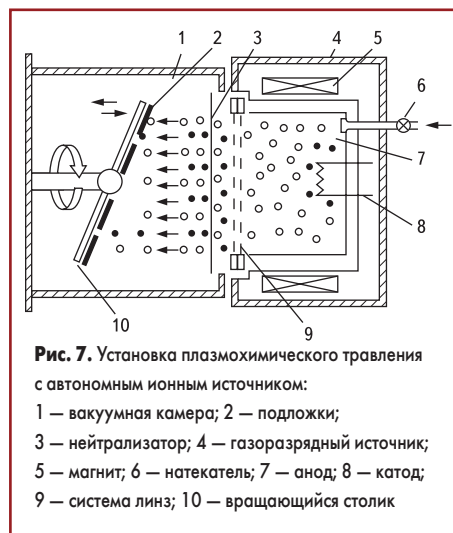


Рис. 7. Установка плазмохимического травления с автономным ионным источником: 1 — вакуумная камера; 2 — подложка; 3 — нейтрализатор; 4 — газоразрядный источник; 5 — магнит; 6 — нагреватель; 7 — анод; 8 — катод; 9 — система линз; 10 — вращающийся столик

Ионное травление — универсальный способ для обработки многослойных пленочных структур с несовместимыми в условиях жидкостной химической обработки свойствами слоев. (Оно может быть использовано для очистки поверхности любых материалов от примесей любого типа.)

Недостатком ионного травления для размерной обработки и формирования конфигураций элементов микросхемы является низкая селективность (избирательность)¹ скорости травления различных материалов. Сюда же можно отнести высокое радиационное и тепловое воздействия, при которых в фор-

¹ Селективность — решающий фактор при формировании конфигураций, так как травление не должно касаться маски и идти глубже того слоя, для которого предназначено.

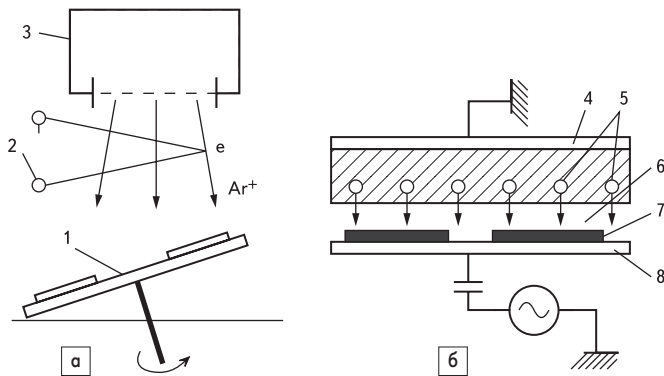


Рис. 8. Схемы реактивного ионно-лучевого (а) и ионно-плазменного ВЧ-травления (б):
1 — подложкодержатель; 2 — эмиттер электронов (нейтрализатор); 3 — источник ионов; 4 — анод;
5 — ионы активного газа; 6 — темное пространство; 7 — подложка; 8 — катод

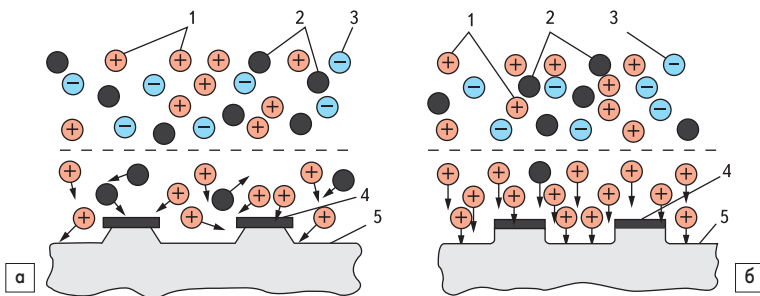


Рис. 9. Схемы плазменного травления поверхности при хаотическом воздействии активных частиц (а); анизотропном процессе (б): 1 — ионы; 2 — радикалы; 3 — электроны; 4 — маска; 5 — подложка

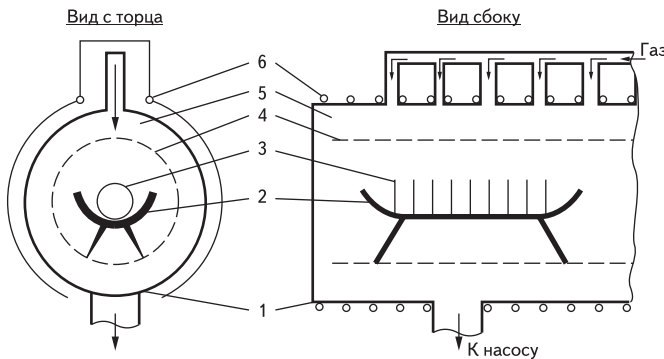


Рис. 10. Реактор плазмохимического травления с объемным расположением подложек:
1 — кварцевые стенки реактора; 2 — кварцевая лодочка; 3 — подложки;
4 — металлический перфорированный цилиндр; 5 — плазма; 6 — ВЧ-генератор

мируемые микроструктуры вносят дефекты, а также загрязнение подложек частицами удаляемого материала.

Схемы реактивного ионно-лучевого и ионно-плазменного высокочастотного травления показаны на рис. 8².

Плазмохимическое травление

Удаление поверхностного слоя материала в этом процессе происходит за счет химического взаимодействия между ионами и радикалами активного газа и атомами обрабатываемой подложки с образованием летучих соеди-

нений. В зависимости от среды, в которой находятся подложки, плазмохимическое травление подразделяют на:

- плазменное (образцы находятся непосредственно в плазме химически активных газов);
- радикальное (образцы находятся в вакуумной камере, отделенной от газоразрядной с химически активной плазмой перфорированными металлическими экранами или магнитными и электрическими полями).

Радикальное травление осуществляется электрически нейтральными, но химически активными атомами или радикалами газоразрядной плазмы.

Плазмохимическое травление может протекать при хаотическом воздействии активных частиц (рис. 9а), но лучше, чтобы они имели направленное движение, при котором процесс становится анизотропным (рис. 9б) и практически не возникает клин травления. Для этого давление в реакторе должно быть не более 10 Па. При этом в рабочий газ добавляют небольшое количество водорода.

Применяют два типа реакторов для плазменного травления, в которых для генерирования плазмы используется ток высокой частоты. Реактор первого типа содержит камеру с внешними электродами, внутри которой имеется держатель для вертикально устанавливаемых пластин (рис. 10). Камера обычно выполняется в форме цилиндра, отсюда название реактора — цилиндрический. В реакторе второго типа электроды находятся внутри, а пластины размещаются горизонтально (рис. 11). Электроды обычно расположены в параллельных плоскостях, поэтому такая конструкция получила название реактора с параллельными электродами.

Благодаря высокой производительности цилиндрического реактора он хорошо подходит для выполнения таких неотвратимых операций, как снятие ФР. Однако этот реактор, как правило, не годится для анизотропного травления. Поэтому реакторы данного типа не пригодны для большинства операций травления при изготовлении СВИС, требующих высокого разрешения и точности.

Несмотря на сравнительно низкие показатели по производительности, реакторы с параллельными обкладками находят сейчас все более широкое применение, так как позволяют выполнять прецизионное анизотропное травление. Более того, они обеспечивают повышенную избирательность (селективность) и позволяют выполнять такие операции, которые для цилиндрических реакторов недоступны, в частности травление контактных окон.

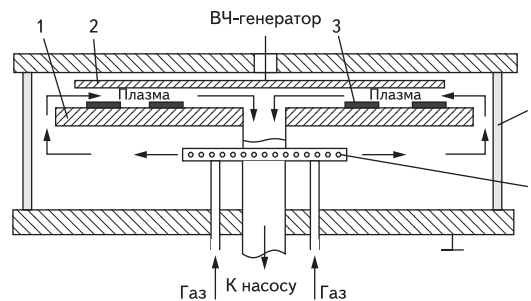


Рис. 11. Реактор плазмохимического травления диодного типа с плоскими электродами:
1, 2 — нижний и верхние электроды; 3 — подложки; 4 — цилиндр из стекла; 5 — система газораспределения

² Скорость ионного травления большинства пленок соизмерима со скоростью травления фоторезистивных масок, толщина последних должна быть 1,3–1,7 мкм (при химической жидкостной обработке она равна 0,5–0,8 мкм). Увеличение толщины слоя ФР снижает разрешающую способность процесса ФЛ.

Таблица 5. Типичные технологические характеристики процессов плазменного травления

Характеристика	ИПТ	ИЛТ	РТ	ПТ	РИПТ	РИЛТ
Средняя скорость травления функционального слоя, $V_{тр}$, нм/с	0,1–1,0	0,3–3,0	1,0–10	3,0–15	1,0–5,0	0,5–3,0
Равномерность травления, $R_{тр}$, %	90–95	95–97	90–99	80–95	90–95	95–97
Селективность травления функционального слоя относительно маски и подслоя, S	2,0–5,0	2,0–5,0	20–50	10–30	5,0–10	5,0–10
Анизотропия травления функционального слоя, $A_{ф.с.}$	5,0–10	10–100	2,0–5,0	5,0–20	10–50	10–100
Коэффициент загрузки, k_3	1,0	1,0	0,5–1,0	0,6–1,0	0,8–1,0	1,0
Показатель перетрава, F	2,0	2,0	1,1	1,3	1,5	1,5

Недостатком плазмохимического травления является трудность контроля клина травления.

Ионно-химическое травление

Ионно-химическое травление сочетает достоинства ионного и плазмохимического травления. Механизм ионно-химического травления — совместное воздействие распыления и химической реакции. Преимущество перед плазмохимическим состоит в возможности травления даже тех материалов, которые не образуют летучих соединений с радикалами.

Ионно-химическое травление осуществляют в тех же установках, что и ионное травление, только в качестве рабочего используют не инертный, а химически активный газ. В диодных системах в большинстве случаев используют для получения плазмы ВЧ-напряжение, обеспечивающее стабильный разряд в химически активных газах (рис. 6). В установках с автономными ионными источниками (рис. 7) нельзя применять накаливаемый катод, который быстро выходит из строя при взаимодействии с химически активной плазмой.

К преимуществам ионно-химического и плазмохимического травления по сравнению с ионным также относится большая скорость обработки, обусловленная сочетанием физического (бомбардировка) и химического (активный газ) воздействий. Создание в реакторах магнитного поля увеличивает скорость и селективность любого из этих методов травления в результате повышения ионизации молекул рабочего газа.

Использование плазменного травления в производстве микросхем

Для травления в технологии СБИС применяют исключительно галогеносодержащие газы, за исключением процессов, связанных с удалением ФР и переносом рисунков на органические пленки, когда используют кислородную плазму. Реакционно-способные радикалы образуются путем разложения галогеносодержащих соединений. Добавки водорода снижают скорость процесса плазменного травления, добавки кислорода в небольших количествах (10–20%) повышают, а в больших — снижают ее. Регулируя технологические параметры — давление в реакционной камере, подводимую мощность, состав плазменной среды, температуру обрабатываемых подложек (100–300 °С), изменяют скорость травления материалов (10–5000 нм/мин), характер картины травления (изотропный или анизотропный (рис. 6)), отношение скорости травления обрабатываемой пленки к скорости травления маски (ФР) и подложки.

Есть у технологии плазменного травления и свои недостатки:

- ограниченный размер партии подложек для реакторов с параллельными обкладками;
- низкая избирательность травления;
- повреждение поверхности микросхем фотонами или частицами плазмы.

Другая проблема плазменного травления — возможное присутствие на подложке мелких нежелательных частиц. Жидкостное химическое травление менее чувствительно к таким загрязнениям.

Типичные значения технологических характеристик процессов плазменного травления приведены в таблице 5 [1].

Вместо заключения

Плазменное травление по сравнению с жидкостным химическим дает небольшое преимущество по надежности и выходу годных микросхем с большими технологическими проектными нормами (6–8 мкм). Но при более жестких нормах (2–4 мкм) эти методы даже нельзя сравнивать. Плазменное травление позволяет изготавливать приборы и структуры, которые находятся за пределами возможностей методов жидкостного химического травления.

Основными преимуществами «сухих» методов обработки при ФЛ являются возможности удаления фоторезистивной маски после травления в едином технологическом цикле, очистка подложек от остатков ФР и других загрязнений³, а также слабая зависимость процесса его удаления от предшествующих режимов термообработки (задубливания). Кроме того, «сухие» методы обеспечивают высокую чистоту подложек и не токсичны.

Литература

1. Энциклопедия машиностроения. Том III-8. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении/ Под ред. Ю. В. Панфилова. М.: Машиностроение. 2000.
2. <http://elanina.narod.ru/lanina/index.files/student/tehnology/text/page11.htm#p4>
3. Черняев В. Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. М.: Радио и связь. 1987.
4. Блохин В. Г. Лекции «Технологии производства микроэлектронной аппаратуры». Москва. РГТУ-МАТИ им. Циолковского, 2004–2005

³ Для удаления ФР используют низкотемпературную плазму кислорода при давлении $(1-5) \times 10^2$ Па и мощности ВЧ-разряда 0,7–1 кВт. При этом ионы кислорода активно окисляют слой ФР, в результате чего образуются летучие соединения CO_2 , NO_2 , H_2O и др. Скорость удаления ФР зависит от давления кислорода, ВЧ-мощности и составляет 0,05–0,3 мкм/мин. Длительность обработки подложек обычно 1–1,5 мин [1].