

# Краткий обзор статей по плазмо-химическому травлению

## 1 Inductively coupled plasma etching of III–V antimonides in $\text{BCl}_3/\text{Ar}$ and $\text{Cl}_2/\text{Ar}$ (DOI: [10.1116/1.590678](https://doi.org/10.1116/1.590678))

**Общая информация:** Исследование ICP травления GaSb и AlGaAsSb в плазмах  $\text{BCl}_3/\text{Ar}$  и  $\text{Cl}_2/\text{Ar}$ . Основной фокус — влияние параметров (мощность ICP, самонапряжение, давление, состав газа) на скорость травления, селективность и морфологию поверхности.

### Конкретная информация:

#### • Образцы:

- GaSb (нелегированный).
- $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.07}\text{Sb}_{0.93}$  (нелегированный, выращенный методом МВЕ).

#### • Газовая смесь:

- $\text{BCl}_3/\text{Ar}$ : 25 sccm  $\text{BCl}_3$  + 5 sccm Ar.
- $\text{Cl}_2/\text{Ar}$ : 25 sccm  $\text{Cl}_2$  + 5 sccm Ar.

#### • Условия травления:

- **Температура:** 10°C (охлаждение катода гелием).
- **Давление:** 2 мТорр (базовое, варьировалось от 1 до 10 мТорр).
- **Мощность ICP:** 250–1000 Вт (базовая — 750 Вт).
- **Самонапряжение RF:** 50–300 В (базовое — 100 В).
- **Длительность:** 2.5 минуты.

#### • Результаты:

##### – $\text{BCl}_3/\text{Ar}$ :

- \* Скорость травления GaSb: до 5100 Å/мин.
- \* Скорость травления AlGaAsSb: до 4200 Å/мин.
- \* Селективность GaSb/AlGaAsSb: ~1.34.
- \* Гладкие поверхности, анизотропные профили.

##### – $\text{Cl}_2/\text{Ar}$ :

- \* Скорость травления GaSb: до 4.6 μм/мин.
- \* Химически доминирующий процесс.

##### – Механизмы:

- \*  $\text{BCl}_3/\text{Ar}$ : доминирует физическое распыление.
- \*  $\text{Cl}_2/\text{Ar}$ : доминирует химическая реакция.

## 2 $\text{BCl}_3/\text{Ar}$ ICP Etching of GaSb and Related Materials for Quaternary Antimonide Laser Diodes (DOI: [10.1149/1.1885305](https://doi.org/10.1149/1.1885305))

**Общая информация:** Исследование ICP травления GaSb, AlGaAsSb и InGaAsSb в плазме  $\text{BCl}_3/\text{Ar}$  для создания лазерных диодов. Основной фокус — влияние соотношения газов, ускоряющего напряжения и мощности ICP на скорость травления, селективность и морфологию поверхности.

### **Конкретная информация:**

#### • Образцы:

- GaSb (нелегированный).
- AlGaAsSb (нелегированный).
- InGaAsSb (нелегированный).

#### • Газовая смесь: $\text{BCl}_3/\text{Ar}$ .

- Расход  $\text{BCl}_3$ : 0–80% (при общем потоке 20 sccm).
- Аргон: дополнение до 20 sccm.

#### • Условия травления:

- Давление: 4 мТорр.
- Мощность ICP: 150–400 Вт.
- Самонапряжение (dc bias): –70 до –200 В.
- Охлаждение: водяное охлаждение катода.
- Маска: фоторезист AZ6809.

#### • Результаты:

##### – Скорость травления:

- \* GaSb: до  $\sim 7100 \text{ \AA}/\text{мин}$  (при 400 Вт ICP).
- \* AlGaAsSb: аналогично GaSb (селективность  $\sim 1.04$ ).
- \* InGaAsSb: значительно ниже ( $1600\text{--}7100 \text{ \AA}/\text{мин}$ ).

##### – Морфология поверхности:

- \* GaSb и AlGaAsSb: RMS шероховатость  $\sim 1.5\text{--}2.0 \text{ нм}$  (сравнимо с необработанными образцами).
- \* InGaAsSb: шероховатость  $\sim 8.6 \text{ нм}$  (при 60%  $\text{BCl}_3$ ).

##### – Механизмы:

- \* Доминирует ионно-ассистированная десорбция продуктов травления.
- \* Низкая скорость травления InGaAsSb связана с нелетучестью  $\text{InCl}_3$ .
- \* При высоких концентрациях  $\text{BCl}_3$  усиливается физическое распыление.

### 3 Inductively Coupled CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> Plasma Etching Process for Mesa Delineation of InAs/GaSb Type-II Superlattice Pixels (DOI: [10.1049/mnl.2018.5549](https://doi.org/10.1049/mnl.2018.5549))

**Общая информация:** Исследование ICP травления сверхрешёток InAs/GaSb типа II в плазме CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> для создания меза-структур с малым шагом пикселей. Основной фокус — оптимизация процесса для получения гладких вертикальных профилей и снижения тёмного тока.

**Конкретная информация:**

- **Образцы:**

- Сверхрешётка InAs/GaSb типа II (p-i-n структура, выращенная методом МВЕ на GaSb подложке).
- Толщина активного слоя: 1.3  $\mu\text{м}$ .

- **Газовая смесь:** CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> (15:40 sccm).

- **Условия травления:**

- Давление: 30 мТорр.
- Мощность ICP: 300 Вт.
- Мощность RF: 200 Вт.
- Маска: алюминий (Al).
- Особенность: исключение этапа очистки O<sub>2</sub> плазмой.

- **Результаты:**

- Скорость травления: до 0.11  $\mu\text{м}/\text{мин}$  (глубина до 2.4  $\mu\text{м}$ ).
- Морфология: гладкие вертикальные стенки (шаг пикселей 10  $\mu\text{м}$ , ширина межпиксельного зазора 2  $\mu\text{м}$ ).

- **Электрические характеристики:**

- Тёмновой ток: 0.11 А/см<sup>2</sup> (0.2 В, 70 К).
- Доминирующий механизм: туннелирование через ловушки в структуре.

- **Механизмы:**

- Исключение O<sub>2</sub> плазмы предотвращает окисление GaSb и шероховатость.
- Высокая скорость травления связана с термической активацией реакций на поверхности GaSb.

### 4 Gas mixture influence on the reactive ion etching of InSb in an inductively coupled methane-hydrogen plasma (DOI: [10.1088/0268-1242/30/6/065014](https://doi.org/10.1088/0268-1242/30/6/065014))

**Общая информация:** Исследование ICP травления InSb в плазме CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Ar для создания меза-фотодиодов с гладкими вертикальными профилями. Основной фокус — влияние состава газовой смеси, давления и добавления Ar на скорость травления и морфологию поверхности.

**Конкретная информация:**

- **Образцы:**
  - InSb (n-типа, p-типа и нелегированный), выращенный методом МВЕ.
  - Структура: буферный слой (400 нм), активный слой (3  $\mu\text{м}$ ), p-слой (500 нм).
- **Газовая смесь:**  $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Ar}$ .
  - Соотношение  $\text{CH}_4/\text{H}_2$ : 10–40% (общий поток 25 sccm).
  - Добавление Ar: 10–60 sccm.
- **Условия травления:**
  - Давление: 10 мТорр.
  - Мощность ICP: 500 Вт. (dc bias: -75 В.)
  - Температура катода: 22°C (охлаждение гелием).
  - Маска:  $\text{SiO}_2$  или фоторезист.
- **Результаты:**
  - Скорость травления: до 110 нм/мин (при 40 sccm Ar).
  - Морфология:
    - \* Шероховатость RMS: 7 нм (оптимальные условия).
    - \* Стехиометрия поверхности: In/Sb 1 (при добавлении Ar).
  - Электрические характеристики:
    - \* Тёмновой ток:  $8 \times 10^{-5}$  А/см<sup>2</sup> (-50 мВ, 80 К).
    - \* Доминирующий механизм: объёмные токи (туннелирование через ловушки).
- **Механизмы:**
  - Добавление Ar улучшает удаление продуктов травления In ( $\text{InCH}_3$ ) за счёт физического распыления.
  - Высокие концентрации Ar (>40 sccm) увеличивают шероховатость.

## 5 Inductively Coupled Plasma Etching in ICl- and IBr-Based Chemistries. Part II: InP, InSb, InGaP, and InGaAs (DOI: [10.1016/S0169-4332\(98\)00594-7](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(98)00594-7))

**Общая информация:** Исследование ICP травления материалов InP, InSb, InGaP и InGaAs в плазмах ICl/Ar и IBr/Ar. Основной фокус — влияние параметров плазмы (мощность ICP, RF, давление) на скорость травления и морфологию поверхности.

### Конкретная информация:

- **Образцы:**
  - InP (легированный Fe).
  - InSb (нелегированный).
  - InGaP и InGaAs (эпитаксиальные слои на подложках GaAs/InP).
- **Газовая смесь:**
  - ICl/Ar: 0–100% ICl (общий поток 15 sccm).

- IBr/Ar: 0–100% IBr (общий поток 15 sccm).
- **Условия травления:**
  - **Давление:** 5–20 мТорр.
  - **Мощность ICP:** 250–750 Вт.
  - **Мощность RF:** 50–350 Вт (dc bias: от –74 до –308 В)
- **Результаты:**
  - **Скорость травления:**
    - \* IBr/Ar: до 3.6  $\mu\text{м/мин}$  (InSb), 3.1  $\mu\text{м/мин}$  (InP).
    - \* ICl/Ar: до 2.2  $\mu\text{м/мин}$  (InP), 1.7  $\mu\text{м/мин}$  (InSb).
  - **Морфология поверхности:**
    - \* ICl/Ar: шероховатость RMS 7.4 нм (InGaP).
    - \* IBr/Ar: шероховатость RMS 27.8 нм (InGaP).
    - \* InP: шероховатость >20 нм (обе химии).
  - **Зависимость от параметров:**
    - \* Скорость травления растёт с увеличением мощности ICP и RF.
    - \* Снижение скорости при повышении давления (>10 мТорр).
- **Механизмы:**
  - Высокая скорость в IBr/Ar связана с летучестью продуктов травления (InBr<sub>3</sub> сублимирует).
  - Ухудшение морфологии в IBr/Ar обусловлено агрессивным физическим распылением.

## 6 Inductively Coupled Plasma Etching of III–V Semiconductors in Cl<sub>2</sub>-Based Chemistries (DOI: [10.1016/S1369-8001\(98\)00002-X](https://doi.org/10.1016/S1369-8001(98)00002-X))

**Общая информация:** Исследование ICP травления III–V полупроводников (GaAs, AlGaAs, GaSb, GaP, InP, InGaAs, InAs, InGaAsP, InSb, InAlAs) в плазмах Cl<sub>2</sub>/Ar, Cl<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>. Основной фокус — влияние параметров плазмы на скорость травления и морфологию поверхности.

### **Конкретная информация:**

- **Образцы:**
  - Ga-материалы: GaAs, AlGaAs, GaSb, GaP.
  - In-материалы: InP, InGaAs, InAs, InGaAsP, InSb, InAlAs.
- **Газовая смесь:**
  - Cl<sub>2</sub>/Ar, Cl<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> (общий поток 15 sccm).
- **Условия травления:**
  - **Давление:** 2–15 мТорр.
  - **Мощность ICP:** 0–1500 Вт.

- **Мощность RF:** 50–400 Вт (dc bias: от –35 до –265 В).
- **Результаты:**
  - **Скорость травления:**
    - \* Ga-материалы: 2000–5000 Å/мин (750 Вт ICP, dc bias –150 В).
    - \* In-материалы: до 6000 Å/мин (InSb).
  - **Морфология:**
    - \* Ga-материалы: гладкие поверхности (RMS 1 нм).
    - \* In-материалы: узкое окно параметров для гладких поверхностей.
  - **Оптимальные условия:** Cl<sub>2</sub>/Ar при низком давлении (2 мТорр).
- **Механизмы:**
  - Высокая плотность ионов в ICP обеспечивает удаление малолетучих продуктов (InCl<sub>3</sub>).
  - Cl<sub>2</sub>/Ar демонстрирует лучшую селективность и универсальность для всех материалов.

## 7 Inductively Coupled Plasma Etching of III–V Semiconductors in BCl<sub>3</sub>-Based Chemistries I: GaAs, GaN, GaP, GaSb and AlGaAs (DOI: [10.1023/A:1007052629883](https://doi.org/10.1023/A:1007052629883))

**Общая информация:** Исследование ICP травления GaAs, GaN, GaP, GaSb и AlGaAs в плазмах BCl<sub>3</sub>/N<sub>2</sub>, BCl<sub>3</sub>/Ar, BCl<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>. Основной фокус — влияние добавок газа, давления и мощности на скорость травления и морфологию поверхности.

### **Конкретная информация:**

- **Образцы:**
  - Ga-материалы: GaAs, GaN, GaP, GaSb, AlGaAs.
- **Газовая смесь:** BCl<sub>3</sub>/N<sub>2</sub>, BCl<sub>3</sub>/Ar, BCl<sub>3</sub>/H<sub>2</sub> (общий поток 15 sccm).
- **Условия травления:**
  - **Давление:** 2–15 мТорр.
  - **Мощность ICP:** до 1000 Вт.
  - **Самонапряжение (dc bias):** от –100 до –680 В.
  - **Маска:** фоторезист Shipley 4330.
- **Результаты:**
  - **Скорость травления:**
    - \* Максимум при 33% N<sub>2</sub> или 87% H<sub>2</sub> в BCl<sub>3</sub>.
    - \* GaAs, GaP, GaSb, AlGaAs: до 1.2 μм/мин.
    - \* GaN: до 0.3 μм/мин.
  - **Морфология:**
    - \* Гладкие поверхности (RMS 0.2–0.8 нм).

\* Стехиометрия сохраняется.

– **Давление:** снижение скорости травления  $>5$  мТорр.

• **Механизмы:**

– Добавление  $N_2$  усиливает диссоциацию  $BCl_3$ , увеличивая концентрацию  $Cl$ .

– Низкое давление и умеренный dc bias улучшают удаление продуктов травления.

## 8 Study of Mesa Etching for Infrared Detector Based on InAs/GaSb Superlattice

(DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.760-762.137](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.760-762.137))

**Общая информация:** Исследование ICP травления меза-структур для инфракрасных детекторов на основе сверхрешёток InAs/GaSb. Основной фокус — влияние параметров травления (время, %  $Cl_2$ , мощность RF) на скорость травления и морфологию поверхности.

**Конкретная информация:**

• **Образцы:**

– InAs/GaSb сверхрешётки (320 периодов, толщина  $1.8\ \mu m$ ), выращенные методом MBE на подложках GaSb.

– Образцы GaSb и InAs (объёмные материалы).

• **Газовая смесь:**  $Cl_2/Ar$  (5/15 sccm).

• **Условия травления:**

– **Давление:** 0.9–1 Па.

– **Мощность ICP:** 400 Вт.

– **Мощность RF:** 100 Вт (варьируется: 50–150 Вт).

– **Маска:**  $SiO_2$  (200 нм).

• **Результаты:**

– **Скорость травления:**

\* GaSb:  $1.3\ \mu m/min$  (стабильная), InAs:  $0.5\ \mu m/min$  (ниже из-за нелетучести  $InCl_x$ ).

\* Сверхрешётки: до  $1.98\ \mu m/min$  (максимум при 80%  $Cl_2$ ).

– **Морфология:**

\* Оптимальные условия: 20–40%  $Cl_2$  (шероховатость RMS 10 нм).

\* При  $>60\%$   $Cl_2$  — шероховатость до 50 нм (накопление продуктов травления).

– **Омические контакты:**

\* GaSb: ICP травление удаляет оксидный слой, улучшая контакт с Ti/Au.

\* InAs: омический контакт формируется без дополнительной обработки.

• **Сравнение с мокрым травлением:**

– Сухое травление обеспечивает меньшую шероховатость (10 нм против  $>80$  нм для тартатного раствора).

• **Механизмы:**

– Высокая мощность RF усиливает физическое распыление, удаляя  $InCl_x$ .

– Избыток  $Cl_2$  приводит к накоплению продуктов и дефектам поверхности.

## 9 Inductively Coupled Plasma Etching of III–V Antimonides in $\text{BCl}_3/\text{SiCl}_4$ Etch Chemistry (DOI: [10.1016/j.tsf.2008.05.029](https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.05.029))

**Общая информация:** Исследование ICP травления GaSb, AlGaAsSb и InGaAsSb в газовой смеси  $\text{BCl}_3/\text{SiCl}_4$ . Основной фокус — влияние параметров травления (мощность смещения, мощность ICP, состав газа, давление) на скорость травления, селективность и морфологию поверхности. Применение для создания гетеропереходных фототранзисторов и глубокого травления GaSb (до 90 мкм).

### Конкретная информация:

- **Образцы:**

- GaSb (Те-легированные подложки).
- Эпитаксиальные слои:  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$  и  $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}_{0.17}\text{Sb}_{0.83}$ , выращенные методом MBE на подложках GaSb.

- **Газовая смесь:**  $\text{BCl}_3/\text{SiCl}_4$  (вариация состава: 2–5 sccm  $\text{BCl}_3$ , 5–2 sccm  $\text{SiCl}_4$ ).

- **Условия травления:**

- **Давление:** 0.3–1.5 Па.
- **Мощность ICP:** 50–300 Вт.
- **Мощность RF:** 50–250 Вт.
- **Маски:**
  - \* Для мелкого травления (<10 мкм): AZ-4330 фоторезист (3 мкм).
  - \* Для глубокого травления (> 90 мкм): AZ-4903 фоторезист (17 мкм).
- **Предварительная обработка:** Ar-плазма (2 мин, 250 Вт RF, 1.0 Па) для удаления оксидов.

- **Результаты:**

- **Скорость травления:**

- \* GaSb: до 4 мкм/мин (максимум при 300 Вт ICP, 100 Вт RF, 1.5 Па).
- \* AlGaAsSb: скорость близка к GaSb (селективность 1).
- \* InGaAsSb: скорость 40% от GaSb (низкая летучесть  $\text{InCl}_x$ ).

- **Морфология:**

- \* Гладкие поверхности (SEM-анализ) для всех материалов.
- \* Вертикальные стенки без подтравливания даже при высоком давлении.
- \* Шероховатость стенок обусловлена маской (AZ-4330/AZ-4903).

- **Глубокое травление GaSb:**

- \* Глубина до 90 мкм (17 мкм маски AZ-4903).
- \* Селективность маска/GaSb: 1:10.
- \* Незначительный положительный угол стенок при длительном травлении.

- **Сравнение с другими методами:**

- $\text{BCl}_3/\text{SiCl}_4$  vs.  $\text{Cl}_2/\text{Ar}$ : выше скорость, гладкие поверхности, вертикальные стенки.
- Отсутствие полимерных загрязнений (в отличие от  $\text{CH}_4/\text{H}_2$ -содержащих смесей).



- **Механизмы:**

- Высокая мощность ICP увеличивает плотность Cl-радикалов, ускоряя химическое травление.
- SiCl<sub>4</sub> повышает концентрацию Cl, BCl<sub>3</sub> подавляет подтравливание.
- Низкая летучесть InCl<sub>x</sub> ограничивает скорость травления InGaAsSb.

- **Применения:**

- Изготовление зеркал и решёток для лазерных диодов среднего ИК-диапазона.
- Окна в подложках GaSb для фотодетекторов с задней засветкой.

## 10 Room Temperature Inductively Coupled Plasma Etching of InAs/InSb in BCl<sub>3</sub>/Cl<sub>2</sub>/Ar (DOI: [10.1016/j.mee.2012.07.018](https://doi.org/10.1016/j.mee.2012.07.018))

**Общая информация:** Исследование ICP травления InAs и InSb при комнатной температуре в газовой смеси BCl<sub>3</sub>/Cl<sub>2</sub>/Ar. Основной фокус — оптимизация параметров (состав газа, мощность ICP/RF, давление) для достижения анизотропного травления с гладкой поверхностью и минимизацией микромаскирования.

**Конкретная информация:**

- **Образцы:**

- InAs и InSb (100) (без легирования, **метод Чохральского**).

- **Газовая смесь:** BCl<sub>3</sub>/Cl<sub>2</sub>/Ar (общий расход BCl<sub>3</sub>/Cl<sub>2</sub> — 10 sccm, Ar — 5 sccm).

- **Условия травления:**

- **Давление:** 2–12 мТорр (оптимум: 4 мТорр).
- **Мощность ICP:** 500–2000 Вт (оптимум: 1000 Вт).
- **Мощность RF:** 100–300 Вт (оптимум: 100 Вт).
- **Маска:** AZ 5214 фоторезист (1.6 мкм).
- **Температура:** 20 °C (без нагрева).

- **Результаты:**

- **Скорость травления:**

- \* InAs: 820 Å/мин (рецепт-A), максимум 1760 Å/мин (1500 Вт ICP).
- \* InSb: 2800 Å/мин (рецепт-A), максимум 3040 Å/мин (1500 Вт ICP).

- **Морфология:**

- \* Шероховатость поверхности (RMS):
  - InAs: 0.25 нм (рецепт-A) vs. 1.95 нм (Cl<sub>2</sub>/Ar).
  - InSb: 0.57 нм (рецепт-A) vs. 12.4 нм (Cl<sub>2</sub>/Ar).
- \* Вертикальные стенки (угол 10°).
- \* Микромаскирование устранено при рецепте-A.

- **Оптимальный рецепт-A:**

- \* Состав: 7.5 sccm BCl<sub>3</sub>, 2.5 sccm Cl<sub>2</sub>, 5 sccm Ar.
- \* Параметры: 4 мТорр, 1000 Вт ICP, 100 Вт RF.

- **Зависимости:**

- **Состав газа:** Минимум шероховатости при 25%  $\text{Cl}_2$ .
- **Мощность ICP:** Рост скорости до 1500 Вт, затем микромаскирование.
- **Давление:** Увеличение давления  $\rightarrow$  снижение скорости и рост шероховатости.
- **Мощность RF:** Рост скорости, но увеличение шероховатости InSb до 34 нм.

- **Механизмы:**

- $\text{BCl}_3$  усиливает физическое распыление,  $\text{Cl}_2$  — химическое травление.
- Баланс  $\text{BCl}_3/\text{Cl}_2$  устраняет микромаскирование  $\text{InCl}_x$ .

- **Применения:**

- Изготовление НЕМТ, магнитных датчиков Холла, ИК-фотодетекторов.

## Некоторые пояснения

### 1. Самонапряжение (dc self-bias)

**Определение:** Постоянное напряжение, возникающее на поверхности подложки в плазме при подаче радиочастотного (RF) сигнала на электрод. Управляет энергией ионов, участвующих в процессе травления.

**Механизм возникновения:**

- Электроны (легкие и подвижные) быстрее достигают электрода, чем положительные ионы.
- На поверхности подложки формируется отрицательный заряд.
- Для компенсации заряда возникает постоянное напряжение (**self-bias**), ускоряющее ионы к поверхности.

**Роль в процессе:**

- **Контроль энергии ионов:**
  - Высокое напряжение → большая энергия ионов → усиление физического распыления (например, удаление  $\text{InCl}_3$ ).
  - Низкое напряжение → деликатное травление (например, для GaAs).
- **Управление селективностью:** Позволяет регулировать соотношение химического/физического вклада в травление.

**Регулирование параметров:**

- **Мощность RF-генератора:**
  - Увеличение мощности ↑ самонапряжение.
- **Давление в камере:**
  - Низкое давление ↑ самонапряжение (меньше столкновений ионов с газом).

**Обозначение в статьях:**

- Часто указывается как **dc bias** или  $V_b$ .
- Ключевой параметр для воспроизводимости процессов ICP-травления.

### 2. Индуктивно-связанная плазма (ICP) для травления

**Что такое ICP?**

- **ICP (Inductively Coupled Plasma)** — метод генерации высокоплотной плазмы с помощью индукционной катушки, питаемой радиочастотным (RF) сигналом (обычно 13.56 МГц).
- **Основное применение:** Травление и осаждение тонких плёнок в микроэлектронике, оптоэлектронике и MEMS-технологиях.

## Принцип работы

- **Генерация плазмы:**

- Переменное магнитное поле от катушки индуцирует ток в газе (например, Ar, Cl<sub>2</sub>, BCl<sub>3</sub>), ионизируя его.
- Образуется плазма с высокой плотностью электронов и ионов ( $10^{11}$ – $10^{12}$  см<sup>-3</sup>).

- **Управление процессом:**

- **ICP мощность:** контролирует плотность плазмы (количество активных радикалов).
- **RF мощность:** задаёт энергию ионов, бомбардирующих подложку (управление анизотропией).

## Преимущества ICP

- **Глубокое анизотропное травление:** Возможность создания структур глубиной >90 мкм с вертикальными стенками.
- **Минимальные повреждения:** Низкая энергия ионов при высокой плотности плазмы уменьшает дефекты.
- **Гибкость:** Поддержка различных газовых смесей (BCl<sub>3</sub>/SiCl<sub>4</sub>, Cl<sub>2</sub>/Ar) для химического, физического или гибридного травления.

## Четыре основных типа плазменного травления

### Sputtering (Физическое травление)

- **Принцип:** Удаление материала происходит исключительно за счёт **физической бомбардировки** высокоэнергетическими ионами (например,  $\text{Ar}^+$ ). Химические реакции отсутствуют.
- **Особенности:**
  - Низкая селективность (зависит от атомной массы материала).
  - Высокая анизотропия (вертикальные стенки).
  - Пример: Удаление оксидов  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с помощью  $\text{Ar}^+$ .

### Pure Chemical Etching (Чисто химическое травление)

- **Принцип:** Материал растворяется за счёт **химических реакций** с нейтральными радикалами ( $\text{Cl}$ ,  $\text{F}$ ) в плазме. Ионы не участвуют в процессе.
- **Особенности:**
  - Высокая селективность (зависит от реакционной способности материала).
  - Изотропные профили (равномерное травление во всех направлениях).
  - Пример: Травление  $\text{Si}$  в  $\text{CF}_4/\text{O}_2$  для создания полостей.

### Ion Energy-Driven Etching (RIE-подобное)

- **Принцип:** Комбинация физического и химического механизмов. **Ионы** (например,  $\text{Ar}$ ) активируют поверхность, облегчая реакцию с радикалами.
- **Особенности:**
  - Умеренная селективность.
  - Анизотропные профили (угол контролируется энергией ионов).
  - Пример: Травление  $\text{SiO}_2$  в  $\text{CHF}_3/\text{Ar}$  для создания вертикальных структур.

### Ion Inhibitor Etching (Травление с ингибиторами)

- **Принцип:** Добавление **газов-ингибиторов** (например,  $\text{C}_4\text{F}_8$ ), которые образуют защитный полимерный слой на боковых стенках, предотвращая боковое травление.
- **Особенности:**
  - Высокая анизотропия (глубокие структуры с вертикальными стенками).
  - Ступенчатый процесс (циклы травления/покрытия).
  - Пример: Bosch-процесс для MEMS-устройств.

### Ключевые различия

Тип	Механизм	Селективность	Анизотропия
Sputtering	Физический	Низкая	Высокая
Pure Chemical	Химический	Высокая	Низкая
Ion Energy-Driven	Физико-химический	Средняя	Средняя/Высокая
Ion Inhibitor	Ингибиторный	Средняя	Очень высокая