

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИИ *BOSCH PROCESS* КАК ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО МЕТОДА ТРАВЛЕНИЯ

Барковская К.Н.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Мадвейко С.И. – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой ЭТТ

Аннотация. Рассмотрена технология выполнения плазмохимического травления *Bosch Process*. В данной статье представлен принцип данного метода, а также особенности проведения обработки материала при выполнении данного способа травления.

Ключевые слова: плазма, травление, плазмохимическое травление, плазменные технологии.

Введение. Плазменные технологии в последнее время являются важным инструментом в производстве микроэлектронных устройств. Выбирая правильные параметры обработки, можно сделать: плазменную очистку, плазменную активацию поверхности, плазменное осаждение, плазменное травление.

Плазменные технологии обладают следующими достоинствами;

- возможность обрабатывать сложные 3D-объекты и микроканалы;
- экологически чистая технология, без отходов химикатов;
- гибкая настройка процесса для придания поверхности специфических свойств;
- способность обрабатывать чувствительные к температуре материалы;
- возможность обрабатывать проводники, полупроводники и изоляторы и пр.;
- низкая стоимость обработки;
- возможность производить продукцию с высокой добавленной стоимостью по отношению к продукту и др [1].

Основная часть. Плазменное травление заключается в снятии материала с поверхностей с использованием плазменных процессов. Его называют также сухим травлением – в контрасте с традиционными мокрыми процессами травления, в которых используются агрессивные кислоты. Плазма технологических газов преобразовывает протравливаемый материал из твердого в газообразное агрегатное состояние, а вакуумный насос отсасывает газообразные продукты. Метод маскирования позволяет выполнять травление лишь отдельных участков или структур. Плазменное травление выполняется только в плазме низкого давления. Это обусловлено тем, что заметный эффект травления достигается путем длительной обработки, и все травящие газы могут использовать только в плазме низкого давления [2].

Существует 3 метода выполнения плазменного травления:

- ионное травление;
- ионно-химическое травление;
- плазмохимическое травление (ПХТ) [3].

Плазмохимическое травление – это передовая технология очистки поверхностей от органических и неорганических загрязнений с использованием плазменной и химической обработки. Это процесс удаления материала с поверхности с использованием плазменного разряда и химических реакций.

При классическом ионном травлении удаление частиц материала происходит за счет соударения ионов рабочего инертного газа, чаще всего аргона, с поверхностью образца. Однако скорость такого процесса невысока и зависит от коэффициента распыления материала изделия.

Чтобы ускорить скорость травления и сделать ее более селективной используется процесс плазмохимического травления, основное отличие которого от классического травления заключается в добавлении в рабочую камеру реактивного газа, чаще всего фтористого. За счет химической реакции с материалом образца и одновременной

бомбардировки инертным газом – аргоном становится возможен процесс глубокого травления, например кремния, который получил название *Bosch Process* [4].

Глубокое реактивное ионное травление (*DRIE*) кремния для создания микроструктур с высоким соотношением сторон является одним из ключевых процессов в области передовых *MEMS*-технологий и применения технологии *TSV* (*through silicon via*). Однако традиционные методы плазменного травления рассчитаны на глубину травления всего в несколько микрон, и им не хватает скорости травления и селективности по маске. Технология *Bosch Process* позволяет получать глубокие изображения с исключительной анизотропией, скоростью травления и селективностью по маске.

Этот процесс состоит из цикла, включающего в себя 3 шага: нанесение пленки, травление нижней плёнки и травление кремнием. В процессе нанесения на боковые стенки и нижнюю поверхность углубления наносится пассивирующая плёнка. При выполнении шага травления нижней плёнки на нижней поверхности углубления пассивирующую плёнку травят выборочно. На этапе травления кремнием на нижней поверхности углубления травят только кремний, где была удалена пассивирующая плёнка. Данный процесс изображён на рисунке 1 [5].

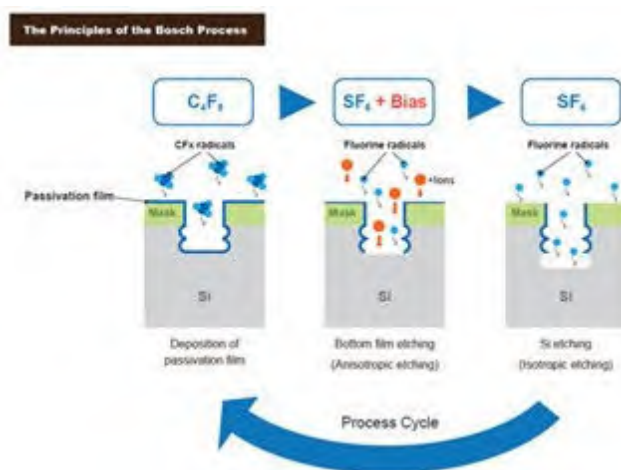


Рисунок 1 – Принцип работы *Bosch Process* [5]

Химические реакции, протекающие при выполнении *Bosch Process* представлены в таблице 1.

Шаг с нанесением обычно использует газ C_4F_8 в качестве осаждающего газа. C_4F_8 представляет собой циклическую молекулу (кольцеобразной формы), в плазме её кольцо разрывается, и она превращается в короткоцепочечную молекулу. Оба конца цепочки C_4F_8 активны. Активные части цепочки соединяются с другими молекулами, и цепочка увеличивается в длину, прикрепляясь к кремнию и образуя мембрану. Эта мембрана выполняет функцию пассивирующей плёнки на этапе травления кремния, предотвращая травление боковых стенок.

SF_6 обычно используется в качестве травильного газа для травления плёнок и кремния. SF_6 диссоциирует в плазме с образованием SF_4 или SF_2 и атомарного фтора, который вступает в реакцию с кремнием. Как SF_4 , так и продукт реакции травления, SiF_4 , существуют в виде газов, которые удаляются из камеры. SF_4 настолько стабилен, что атомы фтора не могут рекомбинировать с ним. Таким образом, может образовываться большое количество атомарного фтора, который участвует в реакции травления [5].

Таблица 1 – Химические реакции *Bosch Process* [5]

Chemical Reaction Notes for Cycle Steps (1) and (3)	
Step 1: Deposition process of passivation film. (C_4F_8 chemical reaction)	Step 3: Silicon etching process. (SF_6 chemical reaction)
1. $C_4F_8 \rightarrow -(CF_2CF_2CF_2CF_2)-$ Cyclic C_4F_8 is ring-opened with plasma and both ends become activated.  C_4F_8 Octafluorocyclobutane (RC318) CAS Number : 115-25-3 UN1976 2. $X-(CF_2)_4- \rightarrow -(CF_2)_{4x}-$: Polymer I A CF_2 polymer is generated when the ring-opened C_4F_8 molecules react with each other. The passivation film is formed when CF_2 polymers are deposited on the surface.	1. $SF_6 \rightarrow SF_4 + 2F$ or $SF_6 \rightarrow SF_2 + 2F$ SF_6 is split into chemically metastable SF_4 and two individual fluorine atoms. 2. $Si(solid) + 4F \rightarrow SiF_4$: Gas ↑ Fluorine atoms react with the silicon. This is isotropic (side) etching.

CF_4 разлагается с образованием атомарного фтора в плазме. Однако реакция разложения обратима, и из CF_4 невозможно получить большое количество атомарного фтора. NF_3 азотирует поверхность кремния и предотвращает травление кремния, в результате чего скорость травления составляет примерно треть от скорости травления SF_6 .

На рисунке 2 представлены реакции, которые объясняют необходимость выполнять этапы осаждения и травления по отдельности [5].

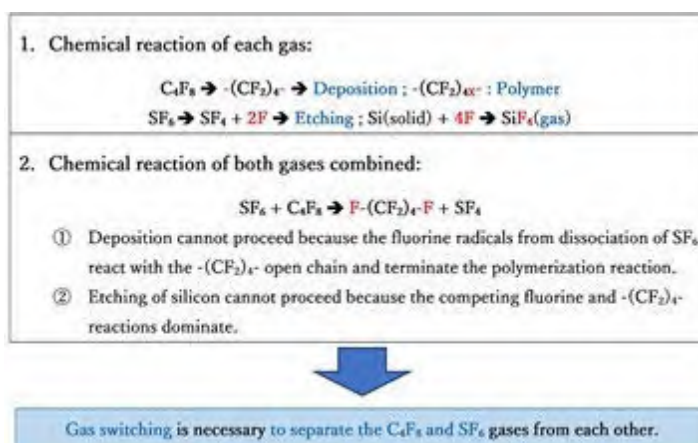


Рисунок 2 – Суть разделения этапов осаждения и травления [5]

Кольцевая структура C_4F_8 разрушается, и в плазме образуется C_4F_8 в форме цепочки. Реакция полимеризации происходит, когда $-(CF_2)_4$ -группы взаимодействуют друг с другом, образуя более длинные цепочки. Полимер образует пассивирующую пленку на поверхностях протравленных углублений. В присутствии SF_6 радикалы фтора, образующиеся в результате диссоциации SF_6 , вступают в реакцию с цепными $-(CF_2)_4$ -группами и прекращают реакцию полимеризации. Кроме того, радикалы фтора исчезают по мере того, как они расходуются в ходе реакции прекращения, и, таким образом, травление не может произойти. Таким образом, быстрое переключение газа каждые 0,1 секунды позволяет избежать смешивания газов C_4F_8 и SF_6 .

На рисунке 3 представлены профили боковых стенок, получаемые в результате выполнения *Bosch Process* [5].

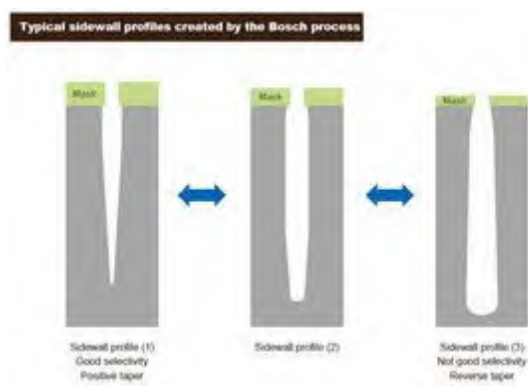


Рисунок 3 – Профили боковой стенки, получаемые при выполнении *Bosch Process* [5]

По рисунку 3 видно, что профили выглядят по-разному, а именно:

1 Профиль (1) непосредственно под маской вертикальный. Он постепенно сужается к низу.

2 Профиль (2) непосредственно под маской имеет обратную конусность. Он становится вертикальным и постепенно сужается по мере увеличения соотношения сторон или глубины травления.

3 Профиль (3) боковой стенки с обратной конусностью [5].

Заключение. Таким образом технология *Bosch Process* позволяет получать глубокие изображения селективно и с высокой скоростью обработки. Однако из-за особенностей технологического процесса возникают следующие сложности:

- на третьем шаге цикла скорость травления сильно зависит от площади отверстия в обрабатываемом материале и хуже переносятся радикалы на нижнюю поверхность такого отверстия;

- образование зазубрин на обрабатываемой поверхности и неровности из-за неравномерности распределения плазмы.

Данные проблемы решаются путём настройки оборудования и режимами обработки [5].

Список литературы

1. Плазменные технологии для обработки поверхности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://sernia.ru/training/plazmennye_tekhnologii_dlya_obrabotki_poverkhnosti/. Дата доступа: 03.03.2026.
2. Плазменное травление: Снятие оксидных слоев, фоторезиста [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.plasma.com/ru/travlenie-plazmoi/>. Дата доступа: 03.03.2026.
3. Плазменное травление (RIE, RIE-ICP, DRIE) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minateh.ru/equipment/technological/plasma-etching/>. Дата доступа: 03.03.2026.
4. Плазмохимическое травление [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gn-tech.ru/tekhnologii/plazmokhimicheskoe-travlenie/#:~:text=Плазмо-химическое%20травление%20-%20это%20передовая,плазменного%20разряда%20и%20химических%20реакций.> Дата доступа: 03.03.2026.
5. What is the Bosch Process (Deep Reactive Ion Etching)? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.samcointl.com/news-events/tutorials/what-is-the-bosch-process/>. Дата доступа: 03.03.2026.

UDC 621.7-4

REVIEW OF THE BOSCH PROCESS TECHNOLOGY AS A PLASMA-CHEMICAL ETCHING METHOD

Barkouskaya K.M.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Madveika S.I. – Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of electronic technique and technology

Annotation. The technology of performing plasma-chemical etching using the Bosch Process has been reviewed. This article presents the principle of this method, as well as the features of material processing when carrying out this etching method.

Keywords: plasma, etching, plasma-chemical etching, plasma technology.