

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ В ПЛАЗМЕ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

В.В. Емельянов¹, А.Н. Купо², В.А. Емельянов³

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск

²Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

³ОАО «Интеграл», Минск

PHENOMENOLOGICAL MODEL OF METAL COATING ETCHING IN A GAS MIXTURED PLASMA

V.V. Emelyanov¹, A.N. Kupo², V.A. Emelyanov³

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk

²Francisk Skorina Gomel State University

³JSC "INTEGRAL", Minsk

Аннотация. Построена феноменологическая модель плазмохимического травления алюминиевого покрытия, являющегося основой токонесущих микроконструкций в технологиях изделий электронной техники, в газовой среде, содержащей парциальные компоненты BCl_3 $c_1 = (50\text{--}65 \text{ об.}\%)$, Cl_2 $c_2 = (25\text{--}35 \text{ об.}\%)$ и N_2 $c_3 = (0\text{--}30 \text{ об.}\%)$ при давлении $P = 150\text{--}250$ мТорр и плотности мощности плазмы $W = 1,6\text{--}2,2$ Вт/см².

Ключевые слова: плазмохимическое травление, алюминиевые межсоединения, математическое моделирование плазменных процессов.

Для цитирования: Емельянов, В.В. Феноменологическая модель травления металлического покрытия в плазме газовой смеси / В.В. Емельянов, А.Н. Купо, В.А. Емельянов // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 4 (57). – С. 69–73. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_4_57_69. – EDN: RRMEEJ

Abstract. A phenomenological model of plasma-chemical etching of an aluminum coating is created, which is the basis of current-carrying microstructures in electronic product technologies, in a gas environment containing partial components BCl_3 $c_1 = (50\text{--}65 \text{ vol.}\%)$, Cl_2 $c_2 = (25\text{--}35 \text{ vol.}\%)$ and N_2 $c_3 = (0\text{--}30 \text{ vol.}\%)$, at a pressure $P = 150\text{--}250$ mTorr, and plasma power density $W = 1,6\text{--}2,2$ W/cm².

Keywords: plasma-chemical etching, aluminum interconnects, mathematical modeling of plasma processes.

For citation: Emelyanov, V.V. Phenomenological model of metal coating etching in a gas mixture plasma / V.V. Emelyanov, A.N. Kupo, V.A. Emelyanov // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2023. – № 4 (57). – P. 69–73. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_4_57_69 (in Russian). – EDN: RRMEEJ

Введение

Уменьшение размеров активных элементов изделий микроэлектроники, и, как следствие, повышение степени интеграции приводит к тому, что существенная площадь изделия оказывается занятой электрическими межсоединениями. Увеличение общей длины межсоединений при неизбежном одновременном уменьшении их поперечного сечения приводит к значительному увеличению импеданса, в результате чего существенно снижается быстродействие приборов. Одним из возможных путей решения указанной проблемы являются многоуровневые межсоединения [1].

В свою очередь, многоуровневая система тоже обладает рядом недостатков, основным из которых является обрыв токоведущих дорожек вследствие нарушения «сплошности» диэлектрических покрытий, формируемых последующим

газофазным осаждением на ступеньках топологического рельефа. Наличие полостей в диэлектрике, заполняющем пространство между токоведущими дорожками, провоцирует развитие паразитных механических микронапряжений и сопутствующих дефектов: накопления неконтролируемых примесей, растрескивания и т. п., приводящих в конечном итоге к отказам приборов. [1], [2].

Ранее авторами в статье [2] предложен один из способов решения такой задачи. Предлагается целесообразным формировать поперечный профиль токоведущих алюминиевых дорожек в форме равнобедренной трапеции с внешними углами при нижнем основании, равными $\theta \approx 75\text{--}85^\circ$. Это приводит к устранению эффекта экранирования при последующем осаждении диэлектрика, предотвращению его преимущественного роста в верхней части канавок между

дорожками и, соответственно, однородному заполнению углублений топологического рельефа материалом диэлектрика и далее материалом последующего слоя. Выбор угла наклона боковых стенок токоведущих дорожек основан как на устранении эффекта экранирования, так и на минимизации полезной площади, занимаемой металлизацией. При углах наклона более 85° , вследствие некоторой неперпендикулярности потока осаждаемых частиц диэлектрика рабочей поверхности полупроводниковой пластины, наблюдается появление отдельных полостей в диэлектрике. С другой стороны, углы наклона менее 75° требуют уже заметного увеличения площади металлизации без снижения ее электрического сопротивления, что является нерациональным [2].

1 Постановка задачи моделирования

Травление пленки сплава на основе алюминия проводят в плазме газовой смеси BCl_3 $c_1 = (50\text{--}65 \text{ об.}\%)$, Cl_2 $c_2 = (25\text{--}35 \text{ об.}\%)$ и N_2 $c_3 = (0\text{--}30 \text{ об.}\%)$ при давлении $P = 150 - 250 \text{ мТорр}$ и плотности мощности плазмы $W = 1,6\text{--}2,2 \text{ Вт/см}^2$.

Микропрофиль зоны травления формируется по механизму анизотропного травления, стимулированного ионной бомбардировкой [3], характерному для случая, когда энергия ионов плазмы $\geq 100 \text{ эВ}$ [4]. При этом управлять степенью пространственной анизотропии травления, в конечном итоге определяющей угол наклона профиля θ , можно, изменяя такие параметры процесса, как давление в рабочей камере (концентрацию ионов), плотность мощности плазмы (энергию ионов), парциальный состав газовой смеси (массы и импульсы ионов). Показатель анизотропии определяется как отношение скоростей

травления в вертикальном и горизонтальном направлениях относительно поверхности материала [3]. Однако, для моделирования в качестве критерия анизотропии целесообразно использовать тангенс угла наклона стенки [5]:

$$\text{tg } \theta = \frac{v_v}{v_h}, \quad (1.1)$$

где v_v – вертикальная составляющая скорости травления; v_h – горизонтальная составляющая скорости травления.

При этом обе составляющие скорости травления в зависимости от параметров процесса имеют тенденцию изменяться, формируя как целевой профиль, так и дефекты процесса (рисунок 1.1): «перетрав» с эрозией маски, «подтрав» нижележащего подслоя, эффект отрицательного клина, trenching-эффект и пр. [6].

В исследуемом процессе проявляется ярко выраженная зависимость анизотропии травления от плотности мощности плазмы и давления в реакторе. При этом, если рост плотности мощности плазмы W однозначно приводит к росту средней кинетической энергии ионов, движущихся перпендикулярно поверхности, т. е. усиливает вертикальную составляющую скорости травления, то, с другой стороны, повышение давления приводит к уменьшению длины свободного пробега и закономерному увеличению вероятности попадания ионов на боковые стенки за счёт столкновений в плазменном потоке. Кроме того, на анизотропию травления влияет фазовый состав плазмы, т. к. ионы разной химической природы имеют различные массы, различный диаметр эффективного сечения взаимодействия, различные статистические распределения по скоростям и импульсам и т. п.

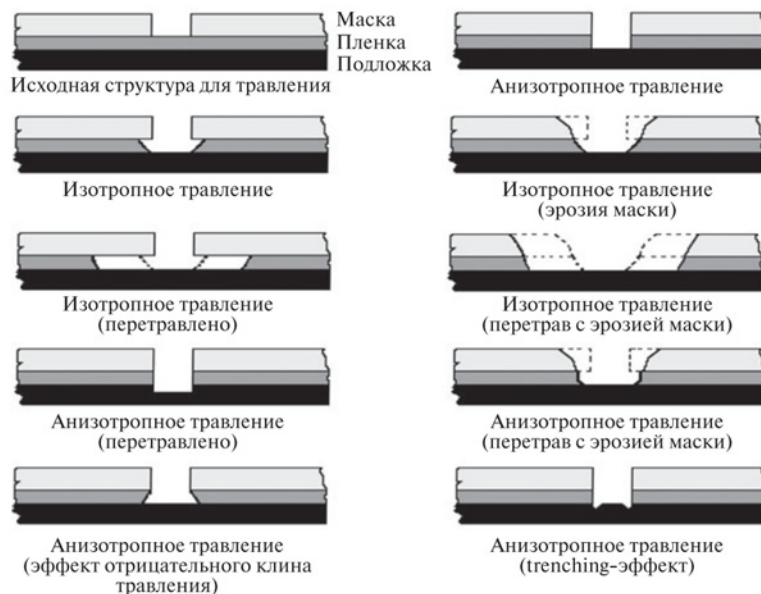


Рисунок 1.1 – Виды изотропного и анизотропного травления и дефекты процесса [6]

Учитывая выше сказанное, будем полагать, что в случае, когда длина свободного пробега молекул $\lambda \geq 0,2$ мкм (толщина слоя Al + 1%Si, подвергаемого травлению 0,8–1,4 мкм), то преобладает вертикальная составляющая скорости травления, и вероятность горизонтального травления минимальна. В случае, когда $\lambda \leq 0,2$ мкм, то за счёт межмолекулярных столкновений, наряду с вертикальной составляющей скорости травления, возникает горизонтальная, обеспечивающая при соответствующих режимах необходимый профиль травления.

При этом, в предположении, что молекулы компонент плазмы ведут себя как твёрдые сферы, среднюю длину свободного пробега $\langle \lambda \rangle$ которых можно рассчитать по формуле [7]:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 P}, \quad (1.2)$$

где: $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура; P – давление плазмы в реакторе; d – эффективный диаметр молекулы.

Поскольку в смеси присутствуют молекулы BCl_3 $d_1 = 0,41$ нм; Cl_2 $d_2 = 0,37$ нм и N_2 $d_3 = 0,32$ нм [8], то можно полагать, что эффективный диаметр сферы столкновения составляет величину, определяемую по формуле:

$$d = c_1 d_1 + c_2 d_2 + c_3 d_3. \quad (1.3)$$

Температура плазмы пропорциональна плотности мощности W , и для оценки можно использовать литературные данные [9], согласно которым в исследуемом диапазоне плотностей мощности значения температуры с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,98$ соответствуют эмпирической линейной зависимости:

$$T = 180,96 \cdot W + 89,97, \quad (1.4)$$

где T – термодинамическая температура (К); W – плотность мощности плазмы ($\text{Вт}/\text{см}^2$).

Далее, основываясь на молекулярно-кинетической модели Максвелла – Больцмана, для расчёта вероятности столкновений в плазменном потоке можно использовать известное выражение, характерное для распределения частиц по длинам свободного пробега в идеальном газе [7]

$$f(\lambda) = \frac{dn}{nd\lambda} = \frac{4}{\sqrt{\pi} \langle \lambda \rangle^3} \lambda^2 \exp\left[-\left(\frac{\lambda}{\langle \lambda \rangle}\right)^2\right]. \quad (1.5)$$

При этом распределение активных частиц по длинам свободного пробега зависит от температуры, давления и объёмной концентрации (эффективный диаметр столкновения) в плазменной смеси (рисунки 1.2–1.4). Функция $f(\lambda)$ представляет собой плотность вероятности того, что относительная доля частиц обладает длиной свободного пробега в интервале $\lambda \pm d\lambda$, тогда вероятность столкновения определяется, как интеграл указанной функции в соответствующих пределах. А именно, доля вертикальной

составляющей скорости травления v_z будет соответствовать интегралу в пределах от 0,2 до 0,8 мкм, что соответствует границе слоя травления, а доля горизонтальной составляющей v_x от «0» до 0,2 мкм.

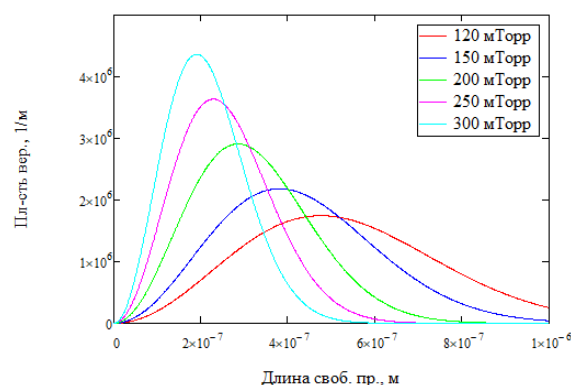


Рисунок 1.2 – Распределение частиц по длинам свободного пробега в случае $T = 300$ К, $d = 0,35$ нм при различных давлениях P газовой смеси

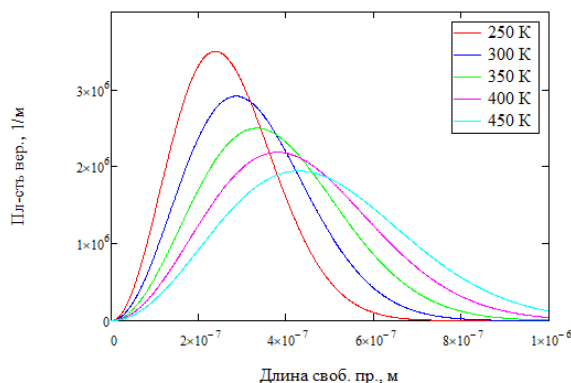


Рисунок 1.3 – Распределение частиц по длинам свободного пробега в случае $P = 200$ мТорр, $d = 0,35$ нм при различных температурах T

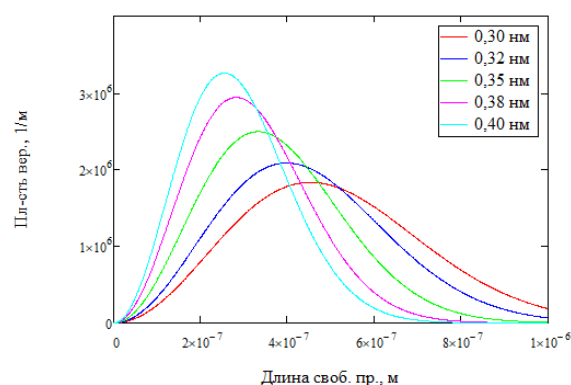


Рисунок 1.4 – Распределение частиц по длинам свободного пробега в случае $P = 200$ мТорр, $T = 350$ К при различных эффективных диаметрах сферы столкновения

Таким образом, варьируя существенные параметры процесса, такие как давление в рабочей камере, плотность мощности плазмы и её парциальный состав, можно оценить вероятность

наличия горизонтальной составляющей скорости травления v_r молекулярного потока.

2 Оценка влияния режимов травления и фазового состава плазмы на структуру покрытия Al + 1%Si

Посредством представленной феноменологической модели проведено исследование зависимостей скоростей травления v_6 и v_2 и, соответственно тангенса угла наклона боковых стенок токоведущих дорожек от давления в рабочей камере P , плотности мощности плазмы W , объёмных долей компонент плазмы (c_1, c_2, c_3).

Например, при $P = 200$ мТорр, $W = 2,0$ Вт/см² и BCl_3 $c_1 = 55$ об.%, Cl_2 $c_2 = 30$ об.% и N_2 $c_3 = 15$ об.%, расчёты проведённые по формулам (1.1)–(1.5) приводят к значению $\theta = 82,7^\circ$ при экспериментальном значении 80° . При этом, для $P = 300$ мТорр, $W = 2,0$ Вт/см² и BCl_3 $c_1 = 55$ об.%, Cl_2 $c_2 = 30$ об.% и N_2 $c_3 = 15$ об.%, расчётный угол наклона боковых стенок составляет $66,9^\circ$, а экспериментальное значение 70° [1]. В таблице 2.1 представлен сравнительный анализ зависимости угла наклона боковых стенок полученных токоведущих дорожек от давления в рабочей камере P при прочих неизменных параметрах.

Таблица 2.1 – Влияние давления P в рабочей камере на угол наклона боковых стенок токоведущих дорожек θ , при $W = 2,0$ Вт/см² и BCl_3 $c_1 = 55$ об.%, Cl_2 $c_2 = 30$ об.% и N_2 $c_3 = 15$ об.%

P , мТорр	θ экспериментальный, °	θ теоретический, °
120	88	87,7
150	85	86,5
200	80	82,7
250	75	76,3
300	70	66,9

Также исследована зависимость угла наклона θ токоведущих дорожек от плотности мощности W плазмы, при неизменном давлении P в рабочей камере реактора. Результаты представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Влияние плотности мощности плазмы на угол наклона боковых стенок токоведущих дорожек θ , при $P = 200$ мТорр и BCl_3 $c_1 = 55$ об.%, Cl_2 $c_2 = 30$ об.% и N_2 $c_3 = 15$ об.%

W , Вт/см ²	θ экспериментальный, °	θ теоретический, °
1,2	73	68,1
1,6	80	78,0
2,0	80	82,7
2,2	80	84,1
2,5	87	85,5

Наиболее интересным, с точки зрения растворения материала металлизированного слоя, является влияние на наклон токоведущих дорожек процентное соотношение травителей BCl_3 и Cl_2 , так как именно они образуют с алюминием летучие соединения, составляющие сам процесс плазменного травления. Результаты такого исследования приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Влияние соотношения объёмных концентраций травителей BCl_3 и Cl_2 (c_1 / c_2) на угол наклона боковых стенок дорожек металлизации θ , при давлении $P = 200$ мТорр и плотности мощности плазмы $W = 2,0$ Вт/см²

c_1 / c_2 , отн.ед	θ экспериментальный, °	θ теоретический, °
55 / 30	80	82,7
45 / 30	85	85,9
50 / 30	85	85,7
65 / 30	80	80,6
70 / 30	70	84,7
55 / 20	65	85,8
55 / 25	80	85,6
55 / 35	80	85,3
55 / 40	90	85,2
45 / 25	70	86,1

Как видно, в отличие от результатов, представленных в таблицах 2.1 и 2.2, в таблице 2.3 для некоторых режимов наблюдаются существенные до 25 % расхождения (значения выделены полужирным начертанием). Такое несоответствие можно объяснить тем, что при превышении концентрации хлорида бора по отношению к молекулярному хлору в 1,8–2,3 раза, образуются новые летучие соединения (продукты реакции непосредственного физического травления), которые активно участвуют во вторичных столкновениях.

Заключение

Представленная феноменологическая модель позволяет оценить влияние параметров процесса плазмохимического травления, таких как давление в рабочей камере, плотность мощности плазмы, соотношение ингредиентов газовой смеси, на скорость и геометрию получаемых поверхностных микроструктур, в частности, «дорожек металлизации». Показано, что такая модель с доверительной вероятностью в процентном выражении не превышающей 7 %, отражает влияние на процесс плазмохимического травления его существенных параметров. Однако, при установлении зависимости анизотропии травления от соотношения концентраций активных компонентов плазмы, в ряде случаев обнаружены существенные расхождения, которые можно объяснить образованием в рабочей камере вторичных продуктов реакции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов, В.В. Многослойные токопроводящие пленки на основе алюминия для полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / В.В. Емельянов, В.А. Емельянов, В.В. Баранов // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. Фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 2. – С. 170–176.
2. Емельянов, В.В. Многослойные системы металлизации субмикронных интегральных схем / В.В. Емельянов // Доклады БГУИР. – 2022. – Т. 20, № 7. – С. 36–42.
3. Технологические процессы осаждения и травления в технологии изготовления ИМС и МЭМС: учеб.-метод. пособие / Д.А. Котов [и др.]. – Минск: БГУИР, 2020. – 68 с.
4. Musil, J. Chen. A perspective of magnetron sputtering in surface engineering / J. Chen Musil // Surface and Coatings Technology. – 1999. – Vol. 112. – P. 162–169.
5. Сангвал, К. Травление кристаллов: теория, эксперимент, применение / К. Сангвал. – Москва: Мир, 1990. – 492 с.
6. Галперин, В.А. Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях: учебное

пособие / В.А. Галперин, Е.В. Данилкин, А.И. Молчанов; под ред. С.П. Тимошенко. – Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 283 с.

7. Шершнев, Е.Б. Основы молекулярно-кинетической теории: практическое пособие / Е.Б. Шершнев, А.Н. Купо, С.А. Лукашевич. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2022. – 31 с.

8. Способы определения размеров молекул [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://obuchonok.ru/node/5683> – Дата доступа: 15.09.2023.

9. Сухое травление алюминия в хлоре / С.А. Пивоваренко, А.В. Дунаев, А.М. Ефремов, В.И. Светцов // Химия и химическая технология. – 2008. – Т. 51, вып. 11. – С. 17–21.

Поступила в редакцию 20.09.2023.

Информация об авторах

Емельянов Виктор Викторович – аспирант
Купо Александр Николаевич – к.т.н., доцент
Емельянов Виктор Андреевич – д.т.н., профессор