

УДК 537. 525

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ И РЕАКТИВНО-ИОННОЕ ТРАВЛЕНИЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ В СРЕДЕ ДИФТОРДИХЛОРМЕТАНА С ГЕЛИЕМ

© 2024 г. Д. Б. Мурин*, И. А. Чесноков, И. А. Гоголев, А. Л. Анохин, А. Е. Молоскин

*Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново, Россия***E-mail: dim86@mail.ru*

Поступила в редакцию 15.02.2024 г.

После доработки 25.03.2024 г.

Принята к публикации 25.03.2024 г.

Экспериментально исследована кинетика взаимодействия высокочастотной плазмы дифтордихлорметана и его смеси с гелием, поверхностью арсенида галлия. Установлено, что в исследованном диапазоне условий происходит полное разложение исходной молекулы дифтордихлорметана до атомарного углерода. Подтверждено, что основными химически активными частицами, обеспечивающими травление, являются химически активные атомы хлора. Показано, что процесс травления протекает в режиме ионно-стимулированной химической реакции, где существенную роль в очистке поверхности играет десорбция продуктов под действием ионной бомбардировки. Проанализированы эмиссионные спектры излучения плазмы в присутствии полупроводниковой пластины арсенида галлия. Выбраны контрольные линии и полосы для контроля скорости процесса травления по интенсивности излучения линий и полос продуктов травления.

Ключевые слова: травление, плазма, кинетика, интенсивности излучения, арсенид галлия, дифтордихлорметан, гелий

DOI: 10.31857/S0544126924040078

1. ВВЕДЕНИЕ

Плазмохимические и реактивно-ионные процессы с использованием плазмы фтор- и хлорсодержащих газов активно применяются в технологии современной электроники для очистки и “сухого” травления поверхности полупроводниковых пластин и функциональных слоев интегральных микросхем. Процесс “сухого” травления является одним из основных процессов при формировании топологического рельефа на поверхности полупроводниковой структуры, например, на арсениде галлия. Арсенид галлия (GaAs) из-за своих физико-химических свойств в настоящее время является одним из наиболее востребованных материалов современной микро- и нанoeлектроники. Например, данный материал обладает большой шириной запрещенной зоны и высокой подвижности носителей заряда. Сочетание последних двух свойств позволяет создавать на основе GaAs широкий спектр высокочастотных быстродействующих приборов и фотоэлектронных устройств. В технологии производства микросхем на основе арсенида галлия используются процессы плазмохимического и ионнохимического травления, для чего применяются, как правило, хлорсодержащие газы, такие как Cl_2 , BCl_3 , CCl_4 и другие [1]. Использование

хлорсодержащих газовых сред связано с тем, что основными продуктами травления арсенида галлия в хлорсодержащей плазме в диапазоне температур 300–600 К являются ненасыщенные хлориды галлия и мышьяка (GaCl_x , AsCl_x при $x \leq 3$) [2, 3–6], которые обладают высоким давлением насыщенных паров ($1 \div 100$ кПа в диапазоне 300 ÷ 400 К для AsCl_3 и $0,1 \div 100$ кПа в диапазоне 300 ÷ 470 К для GaCl_3), что обеспечивает переход этих соединений с поверхности материала в газовую фазу уже при температурах, незначительно превышающих комнатную.

Одним из газов, который может использоваться при травлении арсенида галлия является дифтордихлорметан (CCl_2F_2). Поскольку связь C–F является более прочной, чем C–Cl, преобладающим процессом диссоциации молекулы CCl_2F_2 в плазме является ее распад с образованием атома хлора [7]. На практике часто используют многокомпонентные газовые смеси такие как, например, смесь CCl_2F_2 –He, которая обладает комбинированными свойствами травления поверхности химически активными частицами молекулярного газа и эффективным физическим распылением обрабатываемого материала в гелии. Условия получения оптимального выхода атомов хлора, которые обеспечивают травление арсенида галлия, могут быть

найлены из анализа эмиссионных спектров плазмы дифтордихлорметана с гелием.

Целью данной работы являлось исследование кинетических закономерностей плазмохимического травления GaAs в смеси $\text{CCl}_2\text{F}_2/\text{He}$ переменного состава и исследование спектров излучения плазмы указанных плазмообразующих газов, а также контроль поверхности образцов GaAs после травления посредством атомно-силовой микроскопии.

2. МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для исследования процессов травления арсенида галлия в высокочастотной плазме смеси $\text{CCl}_2\text{F}_2/\text{He}$ использовалась установка Платран-100ХТ. Данная установка предназначена для плазмохимического и реактивно-ионного травления объемных проводниковых, полупроводниковых и диэлектрических материалов, а также тонких функциональных слоев. Установка обеспечивает возможность обработки пластин диаметром до 10 см. Откачка плазмохимического реактора осуществлялась механическим пластинчато-роторным (Leybold BCS) и турбомолекулярным (TMP 803 LMTC) насосами до предельного давления остаточных газов порядка 10^{-6} Тор. Контроль рабочего давления в реакторе осуществлялся баратроном (Baratron 626B). Измерение и контроль расхода дифтордихлорметана и гелия проводились при помощи расходомеров (SEC-E440J) с верхним пределом $200 \text{ см}^3/\text{мин}$. Для возбуждения высокочастотной плазмы использовались ВЧ генератор (COMDEL CX-1250S, 13.56 МГц) с автоматическим устройством согласования (MATCHPRO CRMX-2500). Система контроля температуры предусматривает возможность автоматической стабилизации температуры подложки за счет регулирования скорости потока охлаждающей жидкости (H_2O). В качестве компонентов газовой смеси в работе использовались дифтордихлорметан и гелий. Дифтордихлорметан и гелий брали из баллонов с маркой “чистый” (МРТУ 51-77-66), содержание основного газа не менее 99.985%.

Подвергаемые травлению образцы представляли собой фрагменты полированных пластин GaAs (толщина 400 мкм, площадь 1 см^2). Скорость травления арсенида галлия определялась гравиметрическим методом, путем взвешивания образцов до и после обработки в плазме на аналитических весах WA-34 с точностью $\pm 5 \times 10^{-5} \text{ г}$. Спектральные измерения проводились с использованием оптоволоконных спектрометров AvaSpec-2048 и AvaSpec-3648 с фотоэлектрической системой регистрации сигнала и накоплением данных на ПК в диапазоне длин волн 200–1000 нм, отбор излучения для анализа проводился через кварцевое окно плазмохимического реактора. При расшифровке спектров использовались справочники [8, 9].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование эмиссионных спектров плазмы смеси $\text{CCl}_2\text{F}_2-\text{He}$ показало наличие в них излучения как атомарных, так и молекулярных компонентов (рис. 1 и 2). Излучение атомарных компонентов представлено: двумя группами линий атомарного хлора, в области 430–460 и 700–900 нм. Причем наиболее интенсивными линиями являются 438, 452, 460, 725, 837 нм. Также можно отметить линии атомарного углерода 247 нм, фтора 685, 690 и 703 нм. Спектр излучения гелия представлен группой атомарных линий в диапазоне от 350 до 750 нм, среди которых можно отметить 388, 447, 471, 587, 667, 706 нм.

Излучение молекулярных компонентов представлено полосами CF 209, CF_2 262, Cl_2 256, CCl 277, F_2 388 нм. Излучение молекулярного углерода представлено системой полос Свана в диапазоне 466–563 нм. Наиболее интенсивными, стабильно проявляющимися и свободными от перекрывания с соседними максимумами являются линии: Cl (438, 452, 725, 837 нм), C (247 нм), F (685 нм), He (587 нм) и полосы: Cl_2 (256.4 нм), CCl (277 нм).

На рис. 3 и 4 показаны зависимости интенсивностей излучения линий атомарного хлора и полос

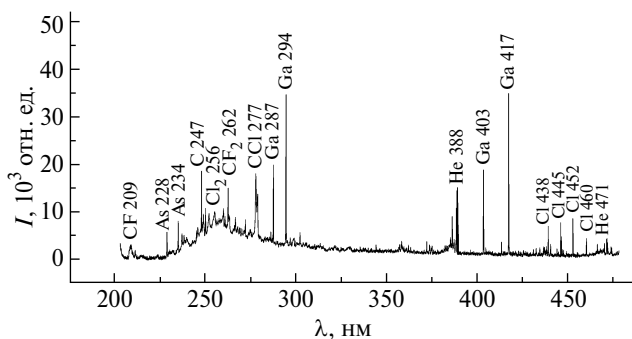


Рис. 1. Спектр излучения ВЧ разряда смеси $\text{CCl}_2\text{F}_2-\text{He}$ при травлении арсенида галлия ($W = 1150 \text{ Вт}$, $U_{\text{dc}} = -200 \text{ В}$, состав смеси 90/10%, общее давление газа 2.4 мТор, $\lambda = 200 \div 480 \text{ нм}$).

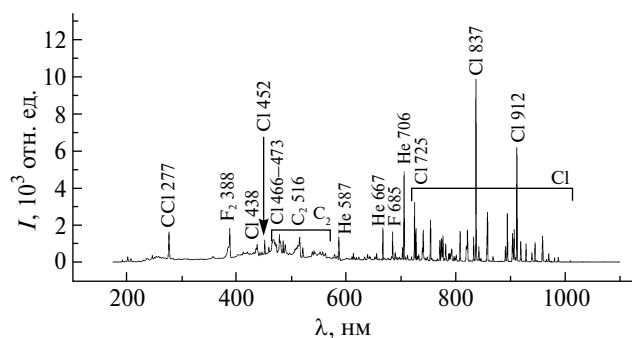


Рис. 2. Общий спектр излучения ВЧ разряда смеси $\text{CCl}_2\text{F}_2-\text{He}$ при травлении арсенида галлия ($W = 1150 \text{ Вт}$, $U_{\text{dc}} = -200$, состав смеси 90/10%, общее давление газа 2.4 мТор, $\lambda = 200 \div 1000 \text{ нм}$).

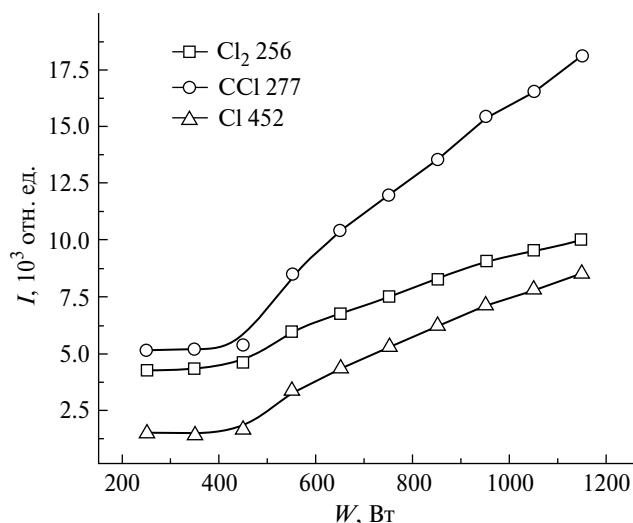


Рис. 3. Зависимость интенсивности излучения от вкладываемой мощности, смесь CCl_2F_2 -He ($W=1150$ Вт, $U_{\text{dc}}=-200$ В, состав смеси 50/50%, общее давление газа 2.4 мТор).

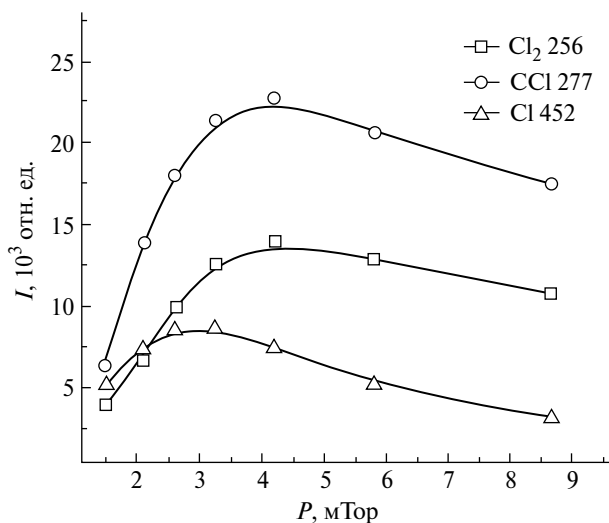


Рис. 4. Зависимость интенсивности излучения от давления газа, смесь CCl_2F_2 -He ($W=1150$ Вт, $U_{\text{dc}}=-200$ В, состав смеси 50/50%, общее давление газа 2.4 мТор).

молекул хлора и радикала CCl от ВЧ мощности и давления газа. Интенсивности излучения линий и полос хлорсодержащих компонентов, а, следовательно, и их относительные концентрации возрастают с увеличением мощности вкладываемой в разряд и не зависят от напряжения смещения. Влияние давления и скорости потока газа на интенсивности излучения характеризуется наличием максимумов при давлении 3–6 мТор и расходах газа порядка 60–100 см³/мин. Последнее связано с тем, что при малых давлениях преобладающим фактором является увеличение концентрации исходных молекул, а при высоких давлениях основным фактором становится уменьшение энергии электронов и, следовательно, убыль константы скорости процесса возбуждения.

В целом плазма дифтордихлорметана является весьма сложным объектом исследования. По данным работ [7, 10, 11] ее состав включает значительное число нейтральных компонент (молекул, атомов и радикалов), столько же положительных ионов, а список процессов с участием электронов, ионов и нейтральных частиц достигает двухсот различных наименований. Механизмы образования и гибели каждой частицы, включающие более десятка различных процессов, могут быть выявлены лишь при детальном математическом моделировании плазмы дифтордихлорметана, но некоторые предположения, вытекающие из данных по влиянию параметров разряда на интенсивность излучения линий и полос, могут быть сделаны. Данные предположения необходимо учитывать при анализе механизмов травления:

1. В исследованном диапазоне условий имеет место полное разложение исходной молекулы до атомарного углерода. Об этом свидетельствует

не только излучение атомарного и молекулярного углерода, но и радикала CCl. Известно, что доминирующим механизмом распада молекулы CCl_2F_2 при электронном ударе являются процессы с отрывом атомов хлора [7, 11], в следствии этого можно предположить, что образование радикалов CCl обусловлено только реакциями вида $\text{C} + \text{Cl} \rightarrow \text{CCl}$, протекающими в объеме плазмы и на поверхности реактора.

2. Наличие в плазме радикалов CF и CF_2 будет способствовать образованию фторуглеродной полимерной пленки на поверхностях, контактирующих с плазмой. Это явление обсуждалось в большом количестве работ, посвященных исследованию плазмы фреонов, например, CF_4 [12–14].

Наиболее однозначные корреляции между концентрацией невозбужденного компонента в газовой фазе и интенсивностью излучения соответствующих возбужденных частиц наблюдаются, если образование возбужденного состояния происходит прямым электронным ударом, а дезактивация является чисто излучательным процессом. В таком случае заселенность возбужденного состояния частицы и интенсивность излучения (I) пропорциональны скорости возбуждения (R_{ex}): $I \sim R_{\text{ex}} = k_{\text{ex}} n_e N$, где k_{ex} — коэффициент скорости возбуждения, n_e — концентрация электронов, N — концентрация частиц в основном состоянии. Если пороговая энергия возбуждения ϵ_{th} превышает среднюю энергию электронов в разряде, коэффициент скорости возбуждения, становится зависимым от внешних параметров разряда. Появление такой зависимости ведет к нелинейной связи интенсивности излучения с концентрацией соответствующих невозбужденных частиц.

Также известно, что увеличение мощности, вкладываемой в разряд, вызывает незначительные изменения коэффициента скорости возбуждения, поэтому основным фактором, определяющим характер соответствующей зависимости, будет являться концентрация электронов. Так как образование возбужденного состояния любого из анализируемых частиц протекает как минимум в две стадии, можно ожидать несколько более быстрого по сравнению с линейным роста интенсивности излучения с мощностью разряда.

Кроме ранее упомянутых излучательных состояний в спектрах излучения плазмы CCl_2F_2 -He в присутствии арсенида галлия появляются линии и полосы продуктов травления: As (228 и 234 нм), Ga (287, 294, 403 и 417 нм) и полосы: GaCl (248, 251 нм), GaF (211 нм). В качестве контрольной была выбрана резонансная линия галлия 417 нм. Энергия возбуждения данной линии составляет 3.07 эВ, что существенно ниже средней энергии электронов в плазме. Это предполагает низкую чувствительность коэффициента скорости возбуждения к изменению параметров плазмы, при этом можно ожидать, что при постоянных мощности, вкладываемой в разряд, и давлении газа интенсивность излучения линии Ga 417 нм пропорциональна концентрации соответствующих частиц в газовой фазе, а, следовательно, и скорости травления. Кроме этого, линия Ga 417 нм является наиболее интенсивной среди эмиссионных максимумов, принадлежащих продуктам реакции и не перекрывается излучением других компонентов плазмы.

Эксперименты [7, 15] показали, что длительная (> 20 мин) выдержка GaAs в атмосфере дифтордихлорметана без разряда при температурах 573–623 К не приводит к химическому взаимодействию на поверхности. Поэтому исходные молекулы CCl_2F_2 могут быть исключены из набора химически активных частиц и в условиях плазмохимического травления. По данным работ [7, 15] также известно, что при плазмохимическом травлении широкого круга неорганических материалов химическая активность радикалов CF_x ($x = 1-3$) и CCl_x ($x = 1-3$) пренебрежимо мала по сравнению с активностью (вероятностью взаимодействия с поверхностью) атомов F или Cl. В таком случае, в качестве основных химически активных частиц при травлении GaAs в плазме дифтордихлорметана следует рассматривать только атомы фтора и хлора. Причем доминирующая роль будет отводиться атомам хлора: 1) механизм диссоциации вида $\text{CF}_n\text{Cl}_m + e \rightarrow \text{CF}_n\text{Cl}_{m-1} + \text{Cl} + e$ при близких константах скоростей рекомбинации атомов [7, 11] неизбежно приведет к диспропорционированию их концентраций в плазме с выполнением условия $n(\text{Cl}) \gg n(\text{F})$; 2) фториды галлия являются значительно менее летучими соединениями, чем хлориды. Например, температура плавления GaCl_3

составляет менее 80°C, в то время как аналогичная величина для GaF_3 , по данным работы [11] превышает 1000°C. Таким образом, взаимодействие GaAs с атомами фтора не обеспечивает развития процесса травления из-за пассивации поверхности нелетучими фторидами галлия.

На рис. 5 и рис. 6 приведены зависимости убыли массы от времени травления в смеси CCl_2F_2 -He, скорости травления арсенида галлия и интенсивности излучения линий атомарного галлия от давления газа в смеси CCl_2F_2 -He, соответственно.

Кинетические зависимости (рис. 5) в пределах погрешности эксперимента линейно возрастают, что соответствует процессам первого кинетического порядка. При смещении, равном нулю,

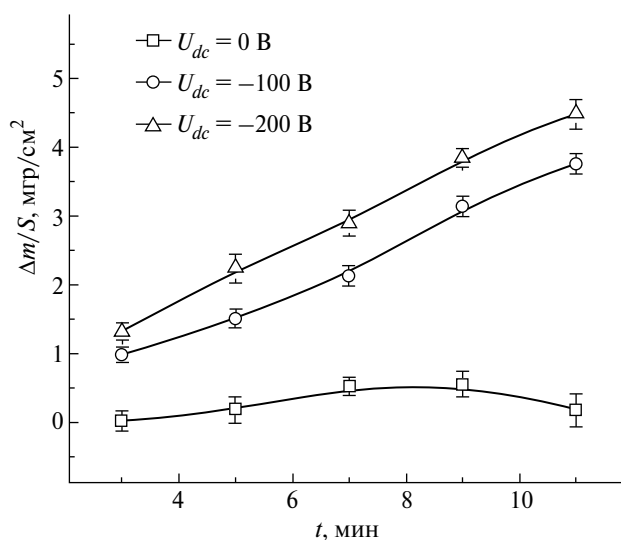


Рис. 5. Зависимость убыли массы от времени травления, смесь CCl_2F_2 -He ($W=1150$ Вт, $T=100$ °C, состав смеси 50/50%, общее давление газа 2.4 мТор).

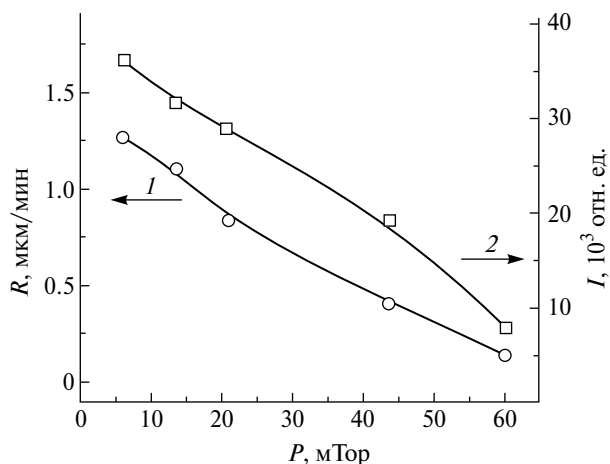


Рис. 6. Зависимости: 1 — скорости травления арсенида галлия от давления газа, 2 — интенсивности излучения линии атомарного Ga (417 нм) от давления газа, смесь CCl_2F_2 -He ($U_{dc} = -200$ В, $T=100$ °C, $t_{\text{трав}} = 5$ мин, состав смеси 50/50%, общее давление газа 2.4 мТор).

травление практически отсутствует, что характерно для процессов с участием ионной бомбардировки. Незначительные скорости травления арсенида галлия в отсутствие ионной бомбардировки позволяют заключить, что ионная составляющая процесса травления в данном случае является доминирующей.

Скорость травления арсенида галлия и интенсивность излучения атомов галлия с увеличением давления газа монотонно уменьшаются (рис. 6), что связано с уменьшением энергии ионов, бомбардирующих катод, а, следовательно, и с уменьшением вклада ионной составляющей в суммарную скорость процесса. Таким образом, можно полагать, что лимитирующей стадией травления в данном случае являются процессы взаимодействия ионов с поверхностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована кинетика и режимы плазмохимического травления GaAs в условиях индукционного ВЧ разряда в смеси CCl_2F_2 -He. Проведен анализ основных излучательных компонентов плазмы смеси CCl_2F_2 -He. Выяснено, что в исследованном диапазоне условий имеет место полное разложение исходной молекулы до атомарного углерода. Наличие в плазме радикалов CF и CF_2 способствует образованию фторуглеродной полимерной пленки на поверхности, находящейся в зоне плазмы. Подтверждено, что основными химически активными частицами, обеспечивающими травление GaAs, являются атомы хлора. Показано, что процесс травления протекает в режиме ионно-стимулированной химической реакции, где существенную роль в очистке поверхности играет десорбция продуктов под действием ионной бомбардировки. Решающую роль при выборе режима травления в исследуемой системе играют электрофизические параметры разряда.

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. Москва: Энергоатомиздат, 1987. С. 264.
2. Дунаев А.В., Ситанов Д.В., Мурин Д.Б. Закономерности взаимодействия меди с хлорсодержащими

- газами // Химия высоких энергий. 2017. Т. 51. № 3. С. 239–243.
3. Franz G., Kelp A., Messerer P. Analysis of chlorine-containing plasmas applied in III/V semiconductor processing // J. Vac. Sci. Technol. 2000. V. 18. № 5. P. 2053–2061.
4. Ibbotson D.E. Plasma and gaseous etching of compounds of Groups III–V // Pure and Appl. Chem. 1988. V. 60. № 5. P. 703–708.
5. Ефремов А.М., Светцов В.И., Пивоваренок С.А., Дунаев А.В. Кинетика травления GaAs в хлорной плазме // Изв ВУЗов. Химия и хим. технология. 2010. Т. 53. Вып. 5. С. 53–56.
6. Grigonis A. The surface composition of GaAs affected by reactive plasma // Surf. Coat. Technol. 1998, V. 110. № 1–2. P. 31–34.
7. Ефремов А.М., Мурин Д.Б., Левенцов А.Е. Кинетика и режимы плазмохимического травления GaAs в условиях индукционного ВЧ разряда в CF_2Cl_2 // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. № 6. С. 429–434.
8. Pearse R.W.B., Gaydon A.G. The identification of molecular spectra. Fourth edition. New York: John Wiley & Sons, inc. 1976. P. 407.
9. Стриганов А.Р., Свентицкий Н.С. Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизированных атомов. Москва: Атомиздат., 1966. С. 899.
10. Wang Y. F., Lee W.J., Chen C.Y. Reaction Mechanisms in Both a $\text{CCl}_2\text{F}_2/\text{O}_2/\text{Ar}$ and a $\text{CCl}_2\text{F}_2/\text{H}_2/\text{Ar}$ RF Plasma Environment // Plasma Chem. and Plasma Proces. V. 20. No 4. 2000. P. 469–494.
11. Stoffels W. W., Stoffels E., Haverlag M. The chemistry of a CCl_2F_2 radio frequency discharge // J. Vac. Sci. Technol. A. V. 13. No 4. 1995. P. 2058–2066.
12. Glauco F. Bauerfeldt and Graciela Arbilla. Kinetic analysis of the chemical processes in the decomposition of gaseous dielectrics by a non-equilibrium plasma — Part 1: CF_4 and CF_4/O_2 // J. Braz. Chem. Soc. 2000. V. 11. No. 2. P. 121.
13. Efremov A. M., Kim D.P., Kim C.I. Effect of gas mixing ratio on gas-phase composition and etch rate in an inductively coupled CF_4/Ar plasma // Vacuum. 2004. V. 75. № 2. P. 133–142.
14. Zhang D., Kushner M.J. Mechanisms for CF_2 radical generation and loss on surfaces in fluorocarbon plasmas // Journal of Vacuum Science & Technology A.: Vacuum, Surfaces, and Films. 2000. V. 18. № 6. P. 2661–2668.
15. Пивоваренок С.А., Дунаев А.В., Мурин Д.Б. Кинетика взаимодействия высокочастотного разряда CCl_2F_2 с арсенидом галлия // Микроэлектроника. 2016. Т. 45. № 5. С. 374–378.

Plasmochemical and Reactive Ion Etching of Gallium Arsenide in Difluorodichloromethane with Helium

© 2024 D. B. Murin*, I. A. Chesnokov, I. A. Gogulev,
A. L. Anokhin, A. E. Moloskin

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"Ivanovo State Chemical-Technological University",
Ivanovo, Russia*

**E-mail: dim86@mail.ru*

The kinetics of interaction of high-frequency plasma of difluorodichloromethane and its mixture with helium with the surface of gallium arsenide was experimentally studied. It was established that in the studied range of conditions, complete decomposition of the original difluorodichloromethane molecule to atomic carbon occurs. It has been confirmed that the main chemically active particles responsible for etching are reactive chlorine atoms. It has been shown that the etching process occurs in the mode of an ion-stimulated chemical reaction, where the desorption of products under the influence of ion bombardment plays a significant role in surface cleaning. The emission spectra of plasma radiation in the presence of a gallium arsenide semiconductor wafer are analyzed. Control lines and stripes were selected to control the speed of the etching process based on the emission intensity of the lines and stripes of the etching products.

Keywords: etching, plasma, kinetics, radiation intensity, gallium arsenide, difluorodichloromethane, helium

REFERENCES

1. Danilin B.S., Kireev V.Yu. Application of low-temperature plasma for etching and cleaning of materials. Moscow: Energoatomizdat, 1987. P. 264.
2. Dunaev A.V., Sitanov D.V., Murin D.B. General features of interaction between copper and chlorine-containing gases // High Energy Chemistry. 2017. V. 51. No. 3. P. 239–243.
<https://doi.org/DOI: 10.1134/S0018143917030031>
3. Franz G., Kelp A., Messerer P. Analysis of chlorine-containing plasmas applied in III/V semiconductor processing // J. Vac. Sci. Technol. 2000. V. 18. No. 5. P. 2053–2061.
<https://doi.org/10.1116/1.1286072>
4. Ibbotson D.E. Plasma and gaseous etching of compounds of Groups III–V // Pure and Appl. Chem. 1988. V. 60. No. 5. P. 703–708.
<https://doi.org/10.1351/pac198860050703>
5. Efremov A.M., Svetsov V.I., Pivovarenok S.A., Dunaev A.V. Kinetics of GaAs etching in chlorine plasma // Izv. VUZov. Chemistry and chem. technology. 2010. V. 53. No. 5. P. 53–56.
6. Grigonis A. The surface composition of GaAs affected by reactive plasma // Surf. Coat. Technol. Vol. 1998. V. 110. No. 1–2. P. 31–34.
[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(98\)00551-9](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(98)00551-9)
7. Efremov A.M., Murin D.B., Leventsov A.E. Kinetics and modes of plasmachemical etching of GaAs under conditions of induction HF discharge in CF₂Cl₂ // Microelectronics. 2014. V. 43. No. 6. P. 429–434.
<https://doi.org/DOI: 10.1134/S1063739714060031>
8. Pearse R.W.B., Gaydon A.G. The identification of molecular spectrum. Fourth edition. New York: John Wiley & Sons, inc. 1976. P. 407. ISBN: 978-94-009-5760-2
9. Striganov A.R., Sventitsky N.S. Tables of spectral lines of neutral and ionized atoms. Moscow: Atomizdat. 1966. P. 899.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4757-6610-3>

10. Wang Y.F., Lee W.J., Chen C.Y. Reaction Mechanisms in Both a $\text{CCl}_2\text{F}_2/\text{O}_2/\text{Ar}$ and a $\text{CCl}_2\text{F}_2/\text{H}_2/\text{Ar}$ RF Plasma Environment // Plasma Chem. and Plasma Proceedings. V. 20. No. 4. 2000. P. 469–494
<https://doi.org/DOI.10.1023/A:1007027805680>
11. Stoffels W.W., Stoffels E., Haverlag M. The chemistry of a CCl_2F_2 radio frequency discharge // J. Vac. Sci. Technol. A.V. 13. No. 4. 1995. P. 2058–2066.
<https://doi.org/10.1116/1.579652>
12. Glauco F. Bauerfeldt and Graciela Arbilla. Kinetic analysis of the chemical processes in the decomposition of gaseous dielectrics by a non-equilibrium plasma — Part 1: CF_4 and CF_4/O_2 // J. Braz. Chem. Soc. 2000. V. 11. No. 2. P. 121.
<https://doi.org/10.1590/S0103-50532000000200004>
13. Efremov A.M., Kim D.P., Kim C.I. Effect of gas mixing ratio on gas-phase composition and etch rate in an inductively coupled CF_4/Ar plasma // Vacuum. 2004. V. 75. No. 2. P. 133–142.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2004.01.077>
14. Zhang D., Kushner M.J. Mechanisms for CF_2 radical generation and loss on surfaces in fluorocarbon plasmas // Journal of Vacuum Science & Technology A.: Vacuum, Surfaces, and Films. 2000. V. 18. No. 6. P. 2661–2668.
<https://doi.org/> <https://doi.org/10.1116/1.1319816>
15. Pivovarenok S.A., Dunaev A.V., Murin D.B. Kinetics of the interaction between a CCl_2F_2 radio-frequency discharge and gallium arsenide // Microelectronics. 2016. V. 45. No. 5. P. 374–378.
<https://doi.org/DOI:10.1134/S1063739716040089>