

13.1

## Обработка поверхности арсенида галлия после травления в плазме $C_2F_5Cl$

© А.И. Охупкин, С.А. Краев, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, С.А. Королев, М.В. Зорина

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия  
E-mail: roa89@ipmras.ruПоступило в Редакцию 14 апреля 2023 г.  
В окончательной редакции 20 июля 2023 г.  
Принято к публикации 14 августа 2023 г.

Представлены четыре различных метода обработки поверхности арсенида галлия после травления в плазме хлорпентафторэтана ( $C_2F_5Cl$ ). Исследованы стехиометрия верхнего слоя, шероховатость, наличие загрязнений. Наиболее оптимальным из представленных методов является комбинация *ex situ* травления в водородной плазме с последующим снятием верхнего слоя посредством жидкостного травления в  $NH_4OH/H_2O_2/H_2O$ . Данным способом возможно удалять загрязнения как с самой поверхности, так и с боковых стенок профиля травления с уровнем шероховатости, пригодным для дальнейшего проведения процессов эпитаксиального роста.

**Ключевые слова:** хлорпентафторэтан, плазмохимическое травление, арсенид галлия, поверхность.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.19.56272.19593

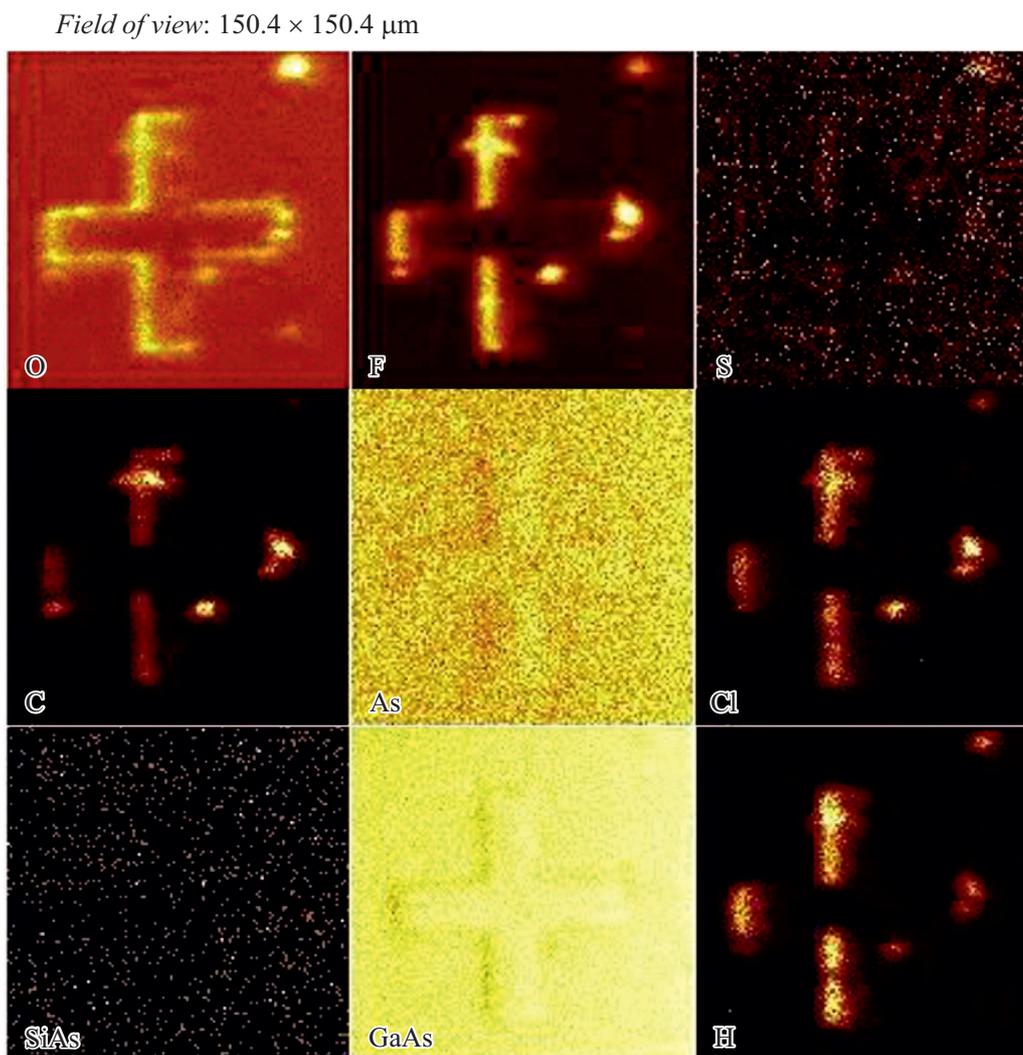
Развитие микроэлектроники на основе арсенида галлия обусловлено рядом его свойств, а именно наличием прямой запрещенной зоны и высокой подвижностью электронов [1]. Арсенид-галлиевые транзисторы обладают радиационной стойкостью и могут работать в СВЧ-диапазоне [2,3], что делает их весьма привлекательными при создании современных систем спутниковой связи и навигации. Для достижения большего уровня тока таких транзисторов используют вертикальное расположение канала [4]. Сформировать его можно с помощью плазмохимического травления в хлорсодержащей плазме, которое отличается высокой анизотропией и отсутствием бокового подтравла [5–7]. В то же время из-за воздействия частиц плазмы может произойти нарушение стехиометрии в структуре GaAs и, как следствие, станет невозможно зарастить канал эпитаксиальными методами. Таким образом, стоит задача создать такие предтравочные условия (стехиометрия приповерхностного слоя, уровень примесей, шероховатость), при которых становится возможным совместить вертикальное травление в хлорсодержащей плазме и эпитаксию.

В предыдущей работе было показано, что травление арсенида галлия в индуктивно-связанной плазме хлорпентафторэтана ( $C_2F_5Cl$ ) носит полирующий характер и не сопровождается возникновением нарушенного приповерхностного слоя [8]. Однако при этом наблюдалось загрязнение поверхности GaAs примесями химических элементов, оказавшихся там в результате неполного удаления остатков фреона. Примеси концентрировались как на дне протравленных канавок, так и на их боковых стенках. Данное обстоятельство может существенно затруднить в дальнейшем эпитаксиальное выращивание полученных структур. В связи с этим

для очистки поверхности GaAs после травления было предложено четыре различных метода: жидкостная обработка в  $NH_4OH/H_2O_2/H_2O$ , *in situ* плазмохимическое травление в хлорной плазме, *ex situ* плазмохимическое травление в водородной плазме и термический отжиг в потоке арсина [9]. Оценивались остаточное содержание примесей и среднеквадратичная шероховатость поверхности. Жидкостное травление поверхностного слоя на небольшую глубину после основного плазмохимического травления должно способствовать удалению примесей и исправлению нарушенной стехиометрии. Плазмохимическая обработка GaAs в водородной и хлорной плазме предполагает мягкое удаление загрязнений с поверхности за счет их стравливания с образованием летучих продуктов. Для этого была выбрана минимальная мощность емкостного разряда (10 W), при которой стабильно поддерживается плазма в реакторе и в то же время не происходит сильного воздействия на структуру. Время обработки подобрано с учетом скорости стравливания GaAs в данном режиме.

Известно, что арсенид галлия в атмосферных условиях образует оксидную пленку, препятствующую проведению эпитаксии [9]. В связи с этим было решено исследовать метод *in situ* обработки поверхности GaAs (без извлечения образца на воздух), а также термический отжиг непосредственно в установке эпитаксиального роста для удаления оксида.

Изначально было проведено плазмохимическое травление пластин арсенида галлия с ориентацией (001) по методике, описанной в работе [10]. Использовалось оборудование ЦКП ИФМ РАН „Физика и технология микро- и наноструктур“. Анализ поверхности GaAs после травления в плазме  $C_2F_5Cl$  выполнен методами



**Рис. 1.** Распределение вторичных ионов элементов по поверхности арсенида галлия (полученное методом ВИМС) после дополнительного жидкостного травления в  $\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ .

вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) (масс-спектрометр „TOFSIMS-5/100“), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (микроскоп „Evo 10“), и атомно-силовой микроскопии (АСМ) (сканирующий зондовый микроскоп NTEGRA PRIMA). Термический отжиг GaAs в потоке арсина проводился в кварцевом реакторе на установке Epiquip VP-502RP. Плазмохимическое травление GaAs в водородной плазме выполнено на установке Oxford PlasmaLab 80.

Среди представленных методов одним из наилучших оказался способ жидкостного травления GaAs в  $\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$  на небольшую глубину ( $\sim 150$  nm), при котором произошло уменьшение содержания примесей без развития шероховатости. Чем ярче выделены области на карте распределения вторичных ионов элементов (рис. 1), тем больше остаточное количество примесей в этих областях. Поскольку для вторичных ионов As и GaAs травленные и нетравленные

участки практически не различаются (крест едва заметен), можно сделать вывод о сохранении в процессе жидкостной обработки стехиометрического состава поверхности арсенида галлия. Данный метод позволяет удалить тонкий верхний загрязненный слой без подтравки под маску. Однако полностью очистить образец от загрязнений этим способом невозможно, так как часть примесей остается на боковых стенках профиля.

Термический отжиг в потоке арсина в течение 10 min при  $700^\circ\text{C}$  способствовал очищению поверхности GaAs от следов фтора и хлора (в меньшей степени от водорода и углерода), а содержание кислорода при этом осталось на прежнем уровне. Арсин в процессе отжига был необходим для сохранения стехиометрии поверхностного слоя [9].

*Ex situ* плазмохимическое травление GaAs в водороде в течение 5 min привело к практически полному удале-

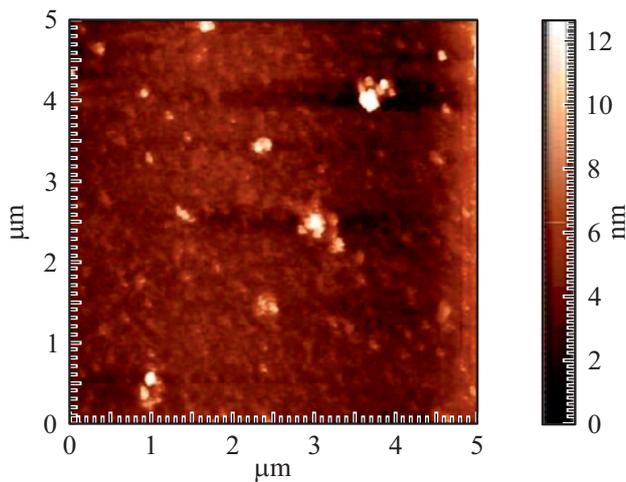


Рис. 2. Рельеф поверхности арсенида галлия после дополнительной обработки в плазме водорода (АСМ-изображение).

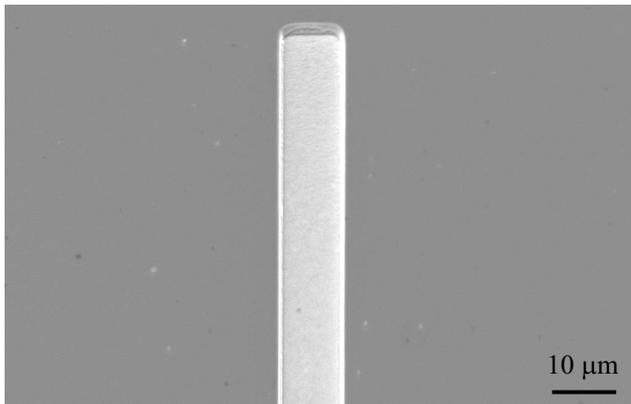


Рис. 3. СЭМ-изображение поверхности травления арсенида галлия после обработки в плазме хлора. Отчетливо видно шероховатое дно у протравленной канавки.

нию остатков кислорода, хлора и фтора ввиду образования летучих продуктов и их откачки из реактора. Важно отметить, что содержание водорода на всей поверхности не изменилось (обработка проводилась после снятия маски). В то же время, несмотря на использование малой мощности емкостного разряда, очистка GaAs в  $H_2$ -плазме все же способствовала некоторому росту шероховатости (рис. 2), значение которой на площади  $25 \mu m^2$  составило 1.4 nm. При этом на поверхности присутствовали участки с крупными локальными неоднородностями.

Наихудшим оказался метод *in situ* травления в хлорной плазме при малой емкостной мощности. После воздействия плазмы произошло нарушение стехиометрии приповерхностного слоя и сильное развитие шероховатости (рис. 3). На рис. 3 заметен сильный топологический контраст между областью, подвергшейся

травлению в  $Cl_2$ -плазме (дно канавки), и остальной поверхностью.

Другим следствием обработки являлось многократное увеличение концентрации всех примесей на поверхности арсенида галлия как на стенках, так и на дне протравленных элементов. Следует отметить, что большая часть этих примесей, скорее всего, уже содержалась в реакторе после основного травления. Проведение последующего процесса без очистки реакционной камеры даже при небольшой мощности способствовало попаданию данных частиц на поверхность GaAs.

Таким образом, из представленных выше способов очистки GaAs после травления в плазме  $C_2F_5Cl$  наилучшим является комбинация *ex situ* травления в водородной плазме при малой мощности с последующей обработкой в растворе  $NH_4OH/H_2O_2/H_2O$ .

### Финансирование работы

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (стипендия Президента РФ для молодых ученых и аспирантов, СП-2056.2021.3).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] М. Шур, *Современные приборы на основе арсенида галлия* (Мир, М., 1991). [M. Shur, *GaAs devices and circuits* (Plenum Press, N.Y.–London, 1987).]
- [2] P.D. Ye, G.D. Wilk, J. Kwo, B. Yang, H.-J.L. Gossmann, M. Frei, S.N.G. Chu, J.P. Mannaerts, M. Sergent, M. Hong, K.K. Ng, J. Bude, *IEEE Electron Dev. Lett.*, **24** (4), 209 (2003). DOI: 10.1109/LED.2003.812144
- [3] M. Fujiwara, H. Nagata, Y. Hibi, H. Matsuo, M. Sasaki, *AIP Conf. Proc.*, **1185** (1), 267 (2009). DOI: 10.1063/1.3292329
- [4] Н.В. Востоков, В.М. Данильцев, С.А. Краев, В.Л. Крюков, Е.В. Скороходов, С.С. Стрельченко, В.И. Шашкин, *ФТП*, **53** (10), 1311 (2019). DOI: 10.21883/FTP.2019.10.48282.22 [N.V. Vostokov, V.M. Daniltsev, S.A. Kraev, V.L. Krukov, E.V. Skorokhodov, S.S. Strelchenko, V.I. Shashkin, *Semiconductors*, **53** (10), 1279 (2019). DOI: 10.1134/S1063782619100245].
- [5] K. Booker, Y.O. Mayon, C. Jones, M. Stocks, A. Blakers, *Vac. Sci. Technol. B.*, **38** (1), 012206 (2020). DOI: 10.1116/1.5129184
- [6] K. Liu, X. Ren, Y. Huang, S. Cai, X. Duan, Q. Wang, C. Kang, J. Li, Q. Chen, J. Fei, *Appl. Surf. Sci.*, **356**, 776 (2015). DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.08.022
- [7] J.W. Lee, H.S. Noh, S.H. Lee, J.H. Park, K.H. Choi, S.J. Pearton, *Thin Solid Films*, **518** (22), 6488 (2010). DOI: 10.1016/j.tsf.2010.02.003

- [8] А.И. Охапкин, С.А. Краев, М.Н. Дроздов, С.А. Королев, Е.А. Архипова, В.М. Данильцев, в сб. *Материалы конф. „Актуальные проблемы физической и функциональной электроники“* (Ульяновск, Россия, 2022), с. 144.
- [9] S.J. Bass, *J. Cryst. Growth*, **31**, 172 (1975).  
DOI: 10.1016/0022-0248(75)90127-X
- [10] А.И. Охапкин, С.А. Краев, Е.А. Архипова, В.М. Данильцев, О.И. Хрыкин, П.А. Юнин, М.Н. Дроздов, *ФТП*, **56** (7), 685 (2022). DOI: 10.21883/ФТП.2022.07.52760.15  
[A.I. Okhapkin, S.A. Kraev, E.A. Arkhipova, V.M. Daniltsev, O.I. Khrykin, P.A. Yunin, M.N. Drozdov, *Semiconductors*, **56** (7), 489 (2022). DOI: 10.21883/SC.2022.07.54652.15].