

Влияние параметров индуктивно-связанной плазмы хлорпентафторэтана на скорость и характеристики травления арсенида галлия

© А.И. Охупкин, С.А. Краев, Е.А. Архипова, В.М. Данильцев,
О.И. Хрыкин, П.А. Юнин, М.Н. Дроздов

Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603087 Нижний Новгород, Россия

E-mail: andy-ohapkin@yandex.ru

Поступила в Редакцию 2 марта 2022 г.

В окончательной редакции 25 марта 2022 г.

Принята к публикации 25 марта 2022 г.

Изучено влияние параметров индуктивно-связанной плазмы хлорпентафторэтана на скорость и характеристики травления арсенида галлия. Протравленные профили GaAs исследовались методами интерферометрии белого света и сканирующей электронной микроскопии. Оказалось, что скорость процесса не зависит от потока фреона, а определяется в большей степени емкостной и индуктивной мощностью, а также давлением. При этом с ростом мощности генератора плазмы существенно ухудшается морфология поверхности, что проявляется в увеличении шероховатости и появлении разного рода дефектов на GaAs и на маске. Проведение процесса при низком давлении приводит к выпадению единичных крупных неоднородностей на подложке. Переход от импульсного к непрерывному режиму травления сопровождается ухудшением анизотропии процесса из-за осаждения на боковых стенках полимерного слоя.

Ключевые слова: хлорпентафторэтан, плазмохимическое травление, индуктивно-связанная плазма, арсенид галлия.

DOI: 10.21883/FTP.2022.07.52760.15

1. Введение

Арсенид галлия — прямозонный полупроводник с высокой подвижностью носителей заряда, на базе которого изготавливаются приборы, стойкие к радиационным дефектам и работающие в условиях высоких нагрузок [1]. Одним из таких устройств является вертикальный полевой транзистор на основе GaAs с управляющим p – n -переходом [2]. Имеется ряд требований к методам изготовления такого транзистора, в частности необходимо сформировать вертикальный канал в GaAs. Обычное жидкостное травление в данном случае не подходит ввиду наличия большого бокового подтравла под маску. Провести анизотропное травление можно плазмохимическим методом; однако если при этом использовать в качестве реагента химически активные газы, такие как хлор [3–6], это может привести к нарушению стехиометрии приповерхностного слоя. В результате многие дальнейшие процессы формирования структуры (в том числе металлоорганическая газофазная эпитаксия) станут невозможными. В этой связи необходимо подобрать плазмообразующие газы с минимальным воздействием на поверхность при травлении. Одним из таких веществ является хлорпентафторэтан (C_2F_5Cl). Этот реагент может выступать одновременно как в качестве основного травителя для GaAs, так и в качестве пассивирующего агента. В предыдущих наших работах была показана возможность „мягкого“ травления арсенида галлия в плазме C_2F_5Cl под металлической маской [7], а также

изучено влияние добавки вышеуказанного фреона к газообразному хлору на этот процесс [8]. В данной работе исследовано непосредственное влияние параметров индуктивно-связанной однокомпонентной плазмы C_2F_5Cl на скорость и характеристики травления арсенида галлия.

2. Методика эксперимента

Были проведены процессы плазмохимического травления GaAs в плазме C_2F_5Cl с различными рабочими параметрами. Варьировались поток фреона (f), давление в реакторе (p), емкостная мощность (Radio Frequency Power, RF_p), индуктивная мощность (Inductively Coupled Plasma Power, ICP_p) и время цикла (t_c). Травление проводилось в импульсном режиме (время бездействия системы 40 с) на установке Oxford Plasmalab80 (Oxford Instruments, Великобритания) с источником индуктивно-связанной плазмы частотой 13.56 МГц. Для предотвращения перегрева образца, он размещался с помощью вакуумной смазки на сапфировой подложке, к которой снизу потоком $30\text{ см}^3/\text{мин}$ подавался газообразный гелий. Использовали арсенид галлия с ориентацией (001). Ориентацию подложек определяли с помощью рентгеновского дифрактометра D8 Discover (Bruker, Германия). Рисунок на поверхности GaAs был сформирован методом взрывной фотолитографии в сочетании с нанесением двухслойной металлической маски V/Ni (по 75 нм каждый слой) электронно-лучевым напылением

на установке Amod 206 (Angstrom Engineering, Канада). Выбор маски обусловлен, с одной стороны, плазмостойкостью никеля, а с другой — хорошей адгезией ванадия к GaAs. Скорость травления (r) и параметры поверхности арсенида галлия (шероховатость S_q , наличие дефектов), а также полученный профиль исследовались методами интерферометрии белого света (оптическая измерительная система Talysurf CCI 2000, Taylor & Hobson, Великобритания) и сканирующей электронной микроскопии (микроскоп EVO 10, Carl Zeiss, Германия).

3. Результаты и обсуждение

При величине $f = 10 \text{ см}^3/\text{мин}$ и малого значения мощности емкостного разряда (10 Вт) скорость травления составляет $\sim 6 \text{ нм}/\text{мин}$. При этом образец GaAs на участке площадью 100 мкм^2 характеризуется однородной гладкой поверхностью с $S_q = 0.7 \text{ нм}$ (рис. 1). Увеличение потока фреона в 8 раз (до $80 \text{ см}^3/\text{мин}$) не приводит к росту скорости процесса. Очевидно, это связано с особенностью строения молекулы хлорпентафторэтана, в результате диссоциации которой образуются частицы, как принимающие участие в травлении, так и способствующие пассивации поверхности [7]. Следует отметить, что поверхность травления арсенида галлия при большом потоке фреона была гладкая, без каких-либо явных дефектов.

Увеличение емкостной мощности с 10 до 75 Вт приводит к росту r в 10 раз (до $60 \text{ нм}/\text{мин}$) в связи с увеличением концентрации хлорсодержащих частиц в плазме (под воздействием высокой мощности генератора

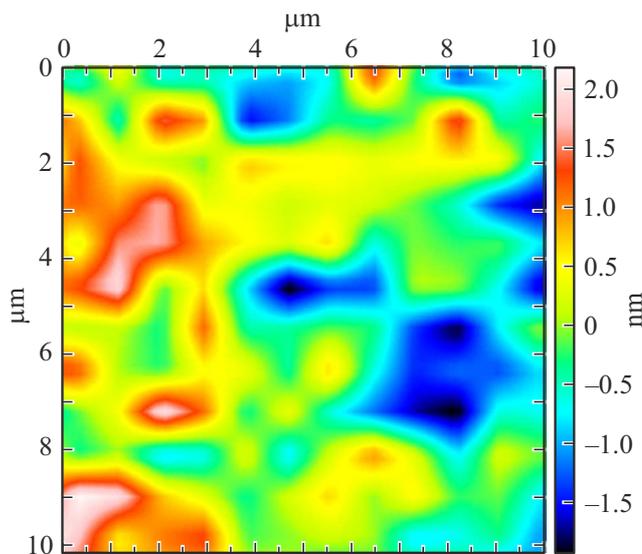
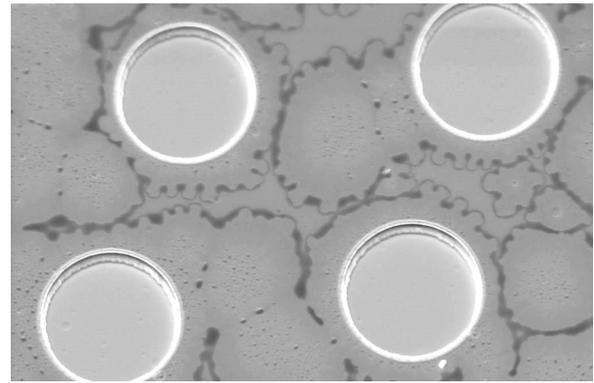


Рис. 1. Изображение с интерферометра белого света поверхности травления GaAs в индуктивно-связанной плазме $\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$ при $RF_p = 10 \text{ Вт}$ и $t_c = 30 \text{ с}$. Здесь и далее $f = 10 \text{ см}^3/\text{мин}$, $p = 11 \text{ мТорр}$. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).



— 5 $\mu\text{м}$

Рис. 2. Изображение с электронного микроскопа профиля травления GaAs в плазме $\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$ при выключенном генераторе ICP ($RF_p = 150 \text{ Вт}$, $t_c = 30 \text{ с}$).

происходит более интенсивный разрыв связи C—Cl в молекуле хлорпентафторэтана) и преобладанием процесса травления над пассивацией. При $RF_p = 150 \text{ Вт}$ скорость травления возрастает еще больше — до $125 \text{ нм}/\text{мин}$. Однако при этом на стенке протравленного профиля GaAs появляется слой продуктов пассивации с неравномерными контурами. Кроме того, вся поверхность маски покрыта дефектами в виде мелких образований округлой формы.

Выключение генератора ICP приводит к уменьшению скорости травления более чем в 2.5 раза. Вместе с этим шероховатость поверхности увеличивается до 1.4 нм , а вокруг протравленных элементов появляются „бортики“. По всей вероятности, это следы оставшегося полимера, который не полностью стравился из-за низкой концентрации бомбардирующих ионов в плазме при полном отсутствии индуктивной мощности. При снижении ICP_p от 250 до 150 Вт r уменьшается незначительно (в пределах 10%). На поверхности металлической маски и на дне протравленных элементов практически отсутствуют дефекты, однако этот режим нельзя считать оптимальным ввиду наличия полимерного слоя на стенках узких канавок.

Зависимость скорости травления арсенида галлия в плазме $\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$ от давления — нелинейная. Так, при повышении p с 5 до 11 мТорр r уменьшается в 1.2 раза; а при 6-кратном увеличении p (до 30 мТорр) скорость процесса снижается всего в 2.5 раза. Снижение скорости травления с ростом давления можно объяснить уменьшением энергии частиц ввиду сокращения их длины свободного пробега. При низком давлении в процессе травления арсенида галлия на поверхность подложки выпадают единичные крупные неоднородности, которые попадают как на маску, так и на протравленные элементы. При высоких значениях p поверхность травления GaAs остается гладкой, однако по контуру элементов

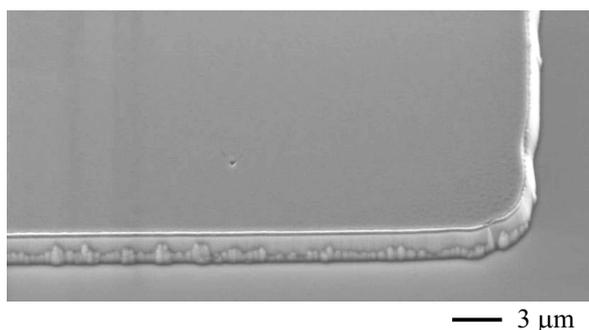


Рис. 3. Изображение с электронного микроскопа профиля травления GaAs (непрерывный режим) в индуктивно-связанной плазме C_2F_5Cl при $RF_p = 150$ Вт и $ICP_p = 250$ Вт.

образуются „бортики“, похожие на те, что наблюдались ранее при выключении генератора ICP.

При сокращении времени цикла в 2 раза (с 30 до 15 с), скорость травления незначительно уменьшается (на $\sim 11\%$), при этом общее время процесса увеличивается существенно. Гораздо большее влияние на характер процесса оказывает проведение травления в непрерывном режиме. В первую очередь это касается ухудшения степени анизотропии. Так, для канавки шириной 9 мкм степень анизотропии составляет 3:1, что меньше в 2 раза по сравнению с величиной анизотропии травления для канавки идентичного размера, полученной в импульсном режиме. Следует отметить, что в непрерывном режиме наблюдается значительное осаждение полимера на боковых стенках профиля травления (рис. 3), причем в гораздо большей степени, чем при импульсном травлении, что в конечном итоге и сказывается на анизотропии. Вероятно, это обусловлено тем, что при непрерывном протекании процесса продукты пассивации не успевают полностью покинуть поверхность травления и остаются на ней в виде полимерного слоя.

4. Заключение

В результате проведенных исследований показано, что увеличение потока хлорпентафторэтана не приводит к изменению скорости травления арсенида галлия. Повышение емкостной мощности способствует увеличению скорости процесса в несколько раз, однако на стенках профиля травления появляется слой продуктов пассивации с неравномерными контурами. При снижении индуктивной мощности уменьшается анизотропия травления, а полное выключение генератора ICP способствует развитию шероховатости поверхности и появлению на маске неоднородностей в виде „чешуек“. С ростом давления в реакторе скорость травления уменьшается в виду уменьшения свободного пробега реакционных частиц плазмы. При пониженном давлении на поверхность подложки выпадают единичные крупные

неоднородности, которые встречаются как на маске, так и на протравленных элементах. Проведение травления GaAs в непрерывном режиме существенно ухудшает степень анизотропии по сравнению с импульсным травлением.

Финансирование работы

Работа поддержана стипендией Президента РФ для молодых ученых и аспирантов СП-2056.2021.3. Плазموхимическое травление и анализ полученного профиля арсенида галлия выполнены на оборудовании ЦКП ИФМ РАН „Физика и технология микро- и наноструктур“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] М. Шур. *Современные приборы на основе арсенида галлия* (М., Мир, 1991) с. 373 [Пер. с англ.: M. Shur. *GaAs Devices and Circuits* (N. Y.–London, Plenum Press, 1987)].
- [2] 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).
- [3] W. HaiLing, G. Xia, S. GuangDi. *Sci. China Ser. E*, **50** (6), 749 (2007).
- [4] R. Braive, L. Le Gratiet, S. Guilet, G. Patriarche, A. Lemaitre, A. Beveratos, I. Robert-Philip, I. Sagnes. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **27** (4), 1909 (2009).
- [5] K. Liu, X.-M. Ren, Y.-Q. Huang, S.-W. Cai, X.-F. Duan, Q. Wang, C. Kang, J.-S. Li, Q.-T. Chen, J.-R. Fei. *Appl. Surf. Sci.*, **356**, 776 (2015).
- [6] D.S. Rawal, B.K. Sehgal, R. Muralidharan, H.K. Malik. *Plasma Sci. Technol.*, **13** (2), 223 (2011).
- [7] А.И. Охапкин, П.А. Юнин, М.Н. Дроздов, С.А. Краев, Е.В. Скороходов, В.И. Шашкин. ФТП, **52** (11), 1362 (2018).
- [8] А.И. Охапкин, С.А. Краев, Е.А. Архипова, В.М. Данильцев, О.И. Хрыкин, П.А. Юнин, М.Н. Дроздов. ФТП, **55** (10), 837 (2021).

Редактор А.Н. Смирнов

Influence of chloropentafluoroethane inductively coupled plasma parameters on the rate and characteristics of gallium arsenide etching

*A.I. Okhapkin, S.A. Kraev, E.A. Arkhipova,
V.M. Daniltsev, O.I. Khrykin, P.A. Yunin, M.N. Drozdov*

Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603087 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract In paper the influence of parameters of inductively coupled chloropentafluoroethane plasma on the rate and characteristics of gallium arsenide etching was studied. Etched GaAs profiles by white light interferometry and scanning electron microscopy were investigated. It turned out that the process rate does not depend on freon flow, but forward and inductive power, as well as pressure determined. In this case, when the power of the plasma generator increase, the surface morphology changes significantly, that manifests itself in roughness increase and the detection of defects on GaAs and mask. Carrying out a process at low pressure leads to the deposition of single large inhomogeneities on the substrate. The transition from pulsed to continuous etching is accompanied by deterioration in the anisotropy of a process due to the polymer layer deposition on side walls.