

НАНОРАЗМЕРНОЕ СТРУКТУРИРОВАНИЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ В ПЛАЗМЕ ВЧ И ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДОВ

© 2021 г. А. В. Дунаев*, Д. В. Барабанов*, Т. А. Жукова*

*ФГБОУ ВО «Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. Д.К. Беляева»,
ул. Советская, 45, Иваново, 153012 Россия

*E-mail: dunaev-80@mail.ru

Поступила в редакцию 18.09.2020 г.

После доработки 12.11.2020 г.

Принята к публикации 26.01.2021 г.

Для формирования топологии на поверхности полупроводников часто применяется хлорсодержащая плазма и ее смеси с молекулярными и инертными газами, а также плазма сложных многоатомных газов, такие как фреоны. В данной статье проведено исследование качества поверхности (на основании данных по шероховатости) полупроводниковой структуры GaAs после плазмохимического травления в плазме смесей HCl/Ar, HCl/Cl₂, HCl/H₂, а также фреона R-12 и его смеси с аргонном. Фреон R-12 часто используется для травления Si, Ge и ряда других материалов (GaAs, GaP, InP), обеспечивая технологически приемлемые скорости взаимодействия, а также удовлетворяет требованиям по анизотропии и селективности. Также, широкое распространение получили смеси «активных» газов с инертными (He, Ar), которые могут выступать как в качестве просто газов-разбавителей, так и источников ионов для ионной бомбардировки образца в целях дополнительной ионной стимуляции десорбции продуктов взаимодействия, что улучшает функциональные свойства поверхности, при некотором снижении скорости взаимодействия. Тем не менее, контроль качества поверхности образцов остается актуальной задачей современной электроники.

DOI: 10.31857/S0544126921040049

ВВЕДЕНИЕ

Очевидно, что технологический процесс формирования микро- и наноструктур в производстве электроники в настоящее время представляет собой тесную взаимосвязь обработки металлов и полупроводников с новейшими научными исследованиями в области плазменных технологий и наукоемких процессов. Так, например, применение плазмы позволяет получать новые уникальные материалы с заданными свойствами, которые трудно получить традиционными методами.

Микроструктурирование поверхности полупроводников с целью получения заданного топологического рельефа высокого разрешения, возможно лишь методами плазменного травления. Плазма хлорсодержащих газов применяется в технологии электроники для очистки и «сухого» травления полупроводниковых пластин и функциональных слоев ИМС. В качестве образца использовался GaAs, который является одним из перспективных материалов электроники будущего и служит основой широкого спектра высокочастотных быстродействующих приборов [1].

Причины этого заключаются в сочетании большой ширины запрещенной зоны и высокой по-

движности носителей заряда, что позволяет создавать на основе GaAs широкий спектр высокочастотных быстродействующих приборов. Кроме этого, GaAs является основным материалом квантовой наноэлектроники на основе гетеропереходов в системе AlGaAs.

В наших работах [2, 3] было проведено сравнительное исследование кинетики и механизмов плазмохимического травления GaAs в Cl₂ и HCl при одинаковых внешних параметрах разряда. Установлено, что в обеих системах характер изменения скорости травления при варьировании тока разряда и давления газа согласуется с изменением плотности потока атомов хлора на обрабатываемую поверхность. Плазма HCl характеризуется более низкими скоростями травления GaAs (например, в 3 раза по сравнению с плазмой Cl₂ при $p = 80$ Па, $i_p = 40$ мА), но обеспечивает значительно меньшую шероховатость поверхности после обработки. Последнее может быть отнесено к реакциям атомов водорода.

Целью данной работы являлось прямое исследование качества поверхности (шероховатости поверхности — как показателя качества обработки) полупроводниковой структуры после плазмохимического травления в плазме смесей HCl/Ar,

HCl/Cl_2 , HCl/H_2 , в тлеющем разряде и в плазме высокочастотного разряда фреона R12 и его смеси с аргоном, для дальнейшего применения полученных результатов в технологии формирования топологии на пластине арсенида галлия.

Фреон R-12 — CCl_2F_2 (или дифтордихлорметан) — бесцветный газ, без запаха. Молекулы фреона инертны в химическом отношении, поэтому газ невзрывоопасен даже при контакте с открытым пламенем. Фреон R-12 играет важную роль в промышленности плазменного травления [1], т.к. легко диссоциирует на химически активные атомы Cl и F. С точки зрения технологии большой интерес вызывает применение для травления смесей с инертным газом, в частности с аргоном, что приводит к существенному улучшению качества поверхности образца [4], а так же позволяет снизить расход газа — реагента без существенного уменьшения скорости травления, и уменьшить выброс токсичных веществ в атмосферу.

Вследствие возрастающих требований к качеству поверхности после обработки, актуальным остается вопрос о методах контроля после операции травления. С точки зрения исследования рельефа, одной из наиболее перспективных является атомно-силовая микроскопия (АСМ), главными достоинствами которой являются: возможность получения достоверных данных о высоте микрорельефа, отсутствие дополнительных промежуточных процедур, возможность получения нанометрового разрешения на воздухе и т.д.

МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для экспериментального исследования взаимодействия плазмы с GaAs в условиях тлеющего разряда постоянного тока использовался цилиндрический проточный плазмохимический реактор (внутренний диаметр $d = 3.4$ см, длина зоны разряда $l = 40$ см). В качестве внешних параметров разряда выступали ток разряда ($i_p = 10\text{--}60$ мА) и давление ($p = 100$ Па) плазмообразующего газа. Для получения HCl был использован химический метод, основанный на реакции между хлористым натрием и серной кислотой [5]. В качестве компонента газовой смеси в работе использовался аргон, водород и хлор. Аргон брали из баллонов с маркой “чистый” (МРТУ 51-77-66), содержание основного газа не менее 99.985%. Для получения водорода использовался метод, в основе которого лежит химическая реакция между Zn и HCl, реакция проводилась в аппарате Кипа [5]. Хлор получали термическим разложением хлорной меди в вакууме [5]. Чистота газов предварительно контролировалась по спектрам излучения разряда, измерение давления газа проводили U-образным масляным манометром.

Для исследования плазмохимических процессов в условиях ВЧ — разряда использовалась установка “Платран-100ХТ”. Она предназначена для плазмохимического травления полупроводниковых материалов, а также металлических пленок, продукты, реакции которых с плазмообразующими газовыми смесями на основе хлора и фтора образуют летучие соединения. Установка обеспечивает возможность обработки пластин диаметром до 100 мм, а также меньших размеров толщиной от 0.3 до 2 мм. Откачка системы производилась механическим пластинчато-роторным (Leybold VCS, производительность $30\text{ м}^3/\text{ч}$) и турбомолекулярным (TMP 803 LMTS, производительность 800 л/с) насосами до предельного давления остаточных газов порядка 10^{-6} Торр. Контроль рабочего давления в реакторе осуществлялся емкостным датчиком (баратрон) с верхним пределом измерения 0.1 Торр. Измерение и контроль расхода плазмообразующего газа проводились при помощи расходомеров с верхним пределом $500\text{ см}^3/\text{мин}$. Система контроля температуры предусматривает возможность автоматической стабилизации температуры подложки за счет регулирования скорости потока охлаждающей жидкости. В наших экспериментах вкладываемая в разряд мощность являлась величиной постоянной и составляла 950 Вт, расход плазмообразующего газа $20\text{ см}^3/\text{мин}$ (~ 1.4 мТорр). Время травления изменялось от (30–150 с) с интервалом 30 с.

Подвергаемые травлению образцы представляли собой фрагменты полированных пластин GaAs (толщина 400 мкм). Контроль рельефа поверхности образцов проводился посредством атомно-силового микроскопа Solver P47-PRO, который позволяет исследовать поверхность образцов на участках размером до 50×50 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В нашей работе мы проводили сравнительное исследование процесса плазмохимического травления GaAs при различных параметрах, для выявления оптимального протекания процесса. Как уже отмечалось, в технологии одним из важнейших аспектов травления является показатель качества поверхности после травления.

В работах [2, 6] говорилось, что плазма хлороводорода позволяет получать полирующее травление GaAs, обеспечивая лучшую равномерность и чистоту процесса за счет эффективного удаления окислов и загрязнений атомарным водородом. Поверхность GaAs, обработанная в чистых хлорсодержащих газах, в частности в хлоре и хлороводороде, не однократно была представлена в виде микрофотографий в наших предыдущих работах [2, 6]. Касательно плазмы HCl утверждалось, что даже в условиях безмасочного травле-

ния после проведения процесса травления поверхность образца остается относительно ровной. Показатель средней квадратичной шероховатости в плазме HCl составляет ($\sigma \sim 120$ нм). Для нетравленных образцов арсенида галлия этот показатель в среднем составлял ~ 7 – 10 нм. Отметим, что наблюдаемые нами скорости травления GaAs в плазме тлеющего разряда в чистом Cl₂ находились выше верхней границы технологически допустимого диапазона, составляющего 0.2 – 0.5 мкм/мин [6, 7]. При таких скоростях возможно неравномерное травление образцов, переосаждение продуктов травления на обрабатываемый материал и другие нежелательные эффекты. В результате травления качество поверхности ухудшается, при этом показатель средней квадратичной шероховатости поверхности составляет ($\sigma = 330$ нм).

Исследование поверхностей образцов GaAs обработанных в смеси HCl/Ar с помощью атомно-силовой микроскопии показало более высокое качество поверхности, чем для плазмы не разбавленного HCl, и это действительно так — показатель средней квадратичной шероховатости (σ) составляет ~ 40 нм, против ($\sigma \sim 120$ нм) в среде HCl. Этого следовало ожидать, так как в смеси скорость спонтанного химического взаимодействия ниже, поэтому и результирующая шероховатость поверхности должна быть также меньше. Однако стоит отметить, что для составов 80/20, 60/40 и 40/60 HCl/Ar соответственно, при $i_p = 40$ мА наблюдается близость показателей средней квадратичной шероховатости, несмотря на существенную разницу в скоростях обработки материала. Это говорит о том, что в условиях смеси ионная стимуляция десорбции протекает гораздо эффективней, чем в случае плазмы неразбавленного HCl, и эффект “микромаскирования” поверхности продуктами взаимодействия проявляется в меньшей степени. Из выше сказанного следует, что инертные газы, в частности аргон, могут выступать как в качестве просто газов — разбавителей (снижение концентрации активных частиц, повышение анизотропии процесса, снижение расхода рабочего газа), так и источников ионов для дополнительной ионной стимуляции десорбции продуктов взаимодействия.

В табл. 1 представлены данные о поверхности образцов GaAs, обработанных в смесях HCl/Cl₂ и HCl/H₂. В отношении смеси HCl/Cl₂ следует отметить, что скорости травления сопоставимы со скоростями в плазме чистого хлора [2, 7], поэтому и ожидался схожий с обработкой в чистом хлоре результат. При токе разряда ($i_p = 40$ мА) скорость спонтанного химического взаимодействия увеличивается практически в 3 раза. В результате этого фиксируется крайне грубая поверхность, свойственная обработке в плазме чистого Cl₂ с явными следами разрушения структуры и переоса-

ждения материала и продуктов взаимодействия на поверхности образца. Показатель средней квадратичной шероховатости составляет ($\sigma = 330$ нм). Это далеко не всегда является приемлемым в технологии современной микро и нанoeлектроники. Для образцов, протравленных в смеси HCl/H₂, для состава 80/20 σ поверхности напрямую коррелирует с изменением скорости обработки. При дальнейшем разбавлении (60/40) σ уже на уровне, близком к нетравленным образцам, на снимках регистрируется небольшое стравливание малого приповерхностного слоя материала. Также были просканированы образцы, убыль массы которых не регистрировалась гравиметрически — зафиксированные снимки практически не отличаются от снимков образцов, не подвергавшихся плазмохимической обработке. Таким образом, водородная химия обеспечивает полирующее травление с сохранением стехиометрии поверхности, однако скорости травления являются очень низкими и часто неприемлемыми с точки зрения технологии [8].

Сводная таблица с данными по шероховатости поверхности (σ), после плазменной обработки в средах HCl/Ar, HCl/Cl₂, HCl/H₂, приведена ниже (табл. 1).

Эксперименты с Фреоном показали, что даже при длительной (более 10 мин) выдержке GaAs в среде CCl₂F₂ (R-12) без разряда изменение массы образца находится на уровне погрешности весовых измерений, что позволяет говорить либо об отсутствии реакции, либо о крайне низкой скорости взаимодействия молекул CCl₂F₂ с арсенидом галлия. Поэтому исходные молекулы CCl₂F₂ можно исключить из набора химически активных частиц и в условиях плазменного травления.

На рис. 1 можно видеть гистограмму распределения средней шероховатости по поверхности образцов подвергнутых травлению в указанном плазмообразующем газе (фреоне), в зависимости от времени воздействия. Показатель шероховатости поверхности образца, σ меняется от (7–14 нм) при времени обработки (30–150 с), кривые 1 и 2 соответственно. Рост величины σ поверхности характерен для обработки образцов в плазме галогенсодержащих газов и приемлем в условиях увеличения времени взаимодействия химически активных частиц плазменной среды с полупроводниковой пластиной [9].

При отсутствии потенциала смещения, энергия ионов не обеспечивает эффективной газификации продуктов травления или разрушения полимерной пленки. Это способствует образованию на поверхности маскирующего слоя, препятствующего доступу химически активных частиц. Лимитирующей стадией процесса здесь предположительно является диффузия атомов хлора и фтора к поверхности твердой фазы (полупроводника), либо деструкция маскирующего

Таблица 1. Зависимость шероховатости поверхности (σ) от времени травления и процентного состава плазмообразующей смеси HCl/Ar, HCl/Cl₂, HCl/H₂

HCl/Ar					
80/20		60/40		40/60	
t, с	σ , нм	t, с	σ , нм	t, с	σ , нм
30	45	30	30	30	20
90	50	90	40	90	25
150	70	150	45	150	35

HCl/Cl ₂					
80/20		60/40		40/60	
t, с	σ , нм	t, с	σ , нм	t, с	σ , нм
30	150	30	200	30	265
90	185	90	270	90	330
150	210	150	325	150	355

HCl/H ₂					
80/20		60/40		40/60	
t, с	σ , нм	t, с	σ , нм	t, с	σ , нм
30	25	30	17	30	12
90	35	90	20	90	15
150	45	150	25	150	20

поверхностного слоя. Увеличение мощности смещения до 200–300 Вт и сопутствующий этому рост энергии физически активных частиц приводит к росту скоростей ионно-стимулированной десорбции продуктов взаимодействия и деструкции приповерхностных слоев материала, обеспечивающих полную очистку обрабатываемой поверхности.

В связи с вышесказанным, ожидается более высокая скорость травления, чем в чистом фреоне без подачи смещения и вследствие этого большая шероховатость поверхности полупроводника, при тех же временах обработки. Это видно, на гистограмме (рис. 1, кривые 3 и 4). Уже при 30 с обработки величина σ составляет 20 нм, что почти в 3 раза больше величины шероховатости травления без подачи потенциала на подложкодержатель. После 150 с плазмохимического взаимодействия с поверхностью образца показатель σ составляет ~65 нм.

Можно предположить, что при дальнейшем увеличении времени обработки (более 150 с), скорость спонтанного химического взаимодействия, еще больше возрастет, в результате чего будет фиксироваться крайне грубая поверхность, с следами разрушения структуры и переосаждения материала и продуктов взаимодействия на поверхности образца. Это не приемлемо в технологии современной микро и нанoeлектроники. Но с

другой стороны объясняет отсутствие необходимости длительной обработки арсенида галлия в плазмохимическом реакторе.

Что касается среды R-12/Ar, то качество поверхности при всех равных условиях и при незначительных потерях в скоростях травления, заметно лучше, так например величина σ после 90 с плазменного травления составляет всего ~6 нм, тогда как в плазме без примеси аргона 11 нм, что может быть выгодно использовано в технологии микро- и наноструктур, рис. 2 – гистограмма распределения средней шероховатости по поверхности образцов подвергнутых травлению в плазменной смеси фреон аргон (R-12 + Ar).

Выше говорилось о поверхности образцов GaAs обработанных в смеси HCl/Ar в условиях тлеющего разряда постоянного тока. Качество поверхности выше, чем для плазмы “чистого” хлороводорода, так как в смеси скорость спонтанного химического взаимодействия ниже, поэтому и результирующая шероховатость поверхности должна быть также меньше. Это говорит о том, что в условиях смеси ионная стимуляция десорбции протекает гораздо эффективней и эффект “маскирования” поверхности продуктами взаимодействия проявляется в меньшей степени. Из чего следует, что инертные газы, в частности аргон могут выступать как в качестве просто газов – разбавителей (снижение концентрации активных частиц, по-

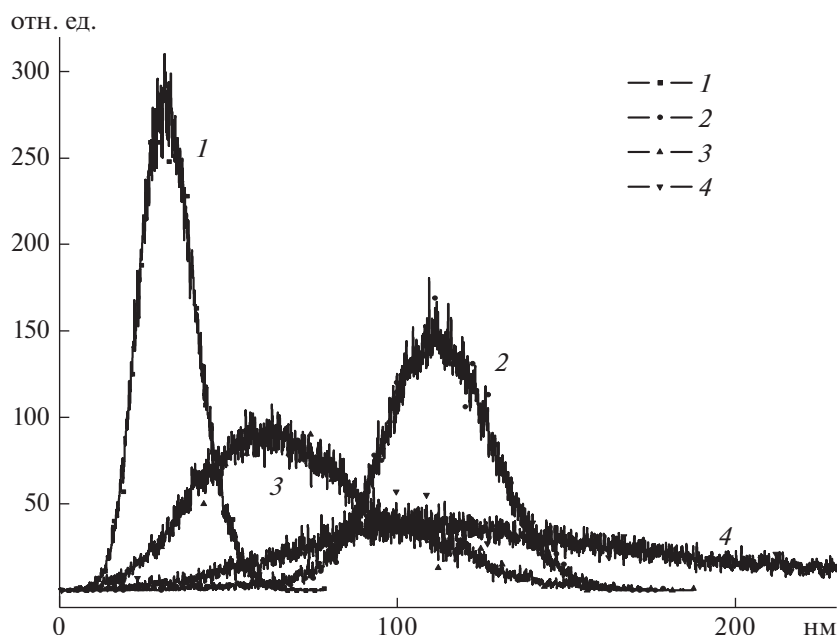


Рис. 1. Гистограмма распределения шероховатости (σ) по поверхности образца GaAs, после обработки в плазме фреона R-12: 1 – $W_{rf}=950$ Вт, $W_{bias}=0$ Вт, $P=1.4$ мТорр, $\tau_{обp}=30$ с; 2 – $W_{rf}=950$ Вт, $W_{bias}=0$ Вт, $P=1.4$ мТорр, $\tau_{обp}=150$ с; 3 – $W_{rf}=950$ Вт, $W_{bias}=300$ Вт, $P=1.4$ мТорр, $\tau_{обp}=30$ с; 4 – $W_{rf}=950$ Вт, $W_{bias}=300$ Вт, $P=1.4$ мТорр, $\tau_{обp}=150$ с.

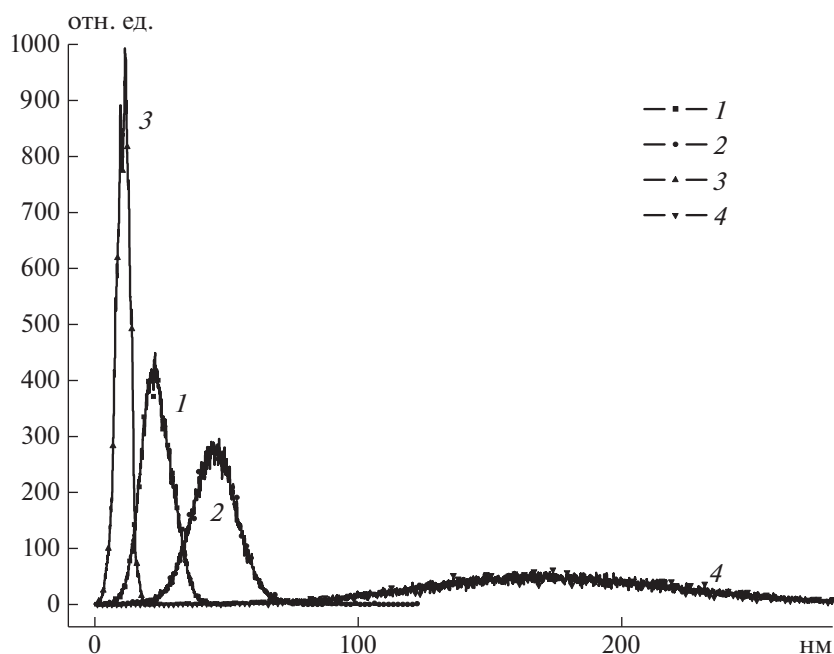


Рис. 2. Гистограмма распределения шероховатости (σ) по поверхности образца GaAs, после обработки в плазме фреона R-12 + Ar: 1 – $W_{rf}=950$ Вт, $W_{bias}=0$ Вт, $P=1.4$ мТорр, $\tau_{обp}=30$ с; 2 – $W_{rf}=950$ Вт, $W_{bias}=0$ Вт, $P=1.4$ мТорр, $\tau_{обp}=150$ с; 3 – $W_{rf}=950$ Вт, $W_{bias}=300$ Вт, $P=1.4$ мТорр, $\tau_{обp}=30$ с; 4 – $W_{rf}=950$ Вт, $W_{bias}=300$ Вт, $P=1.4$ мТорр, $\tau_{обp}=150$ с.

вышение анизотропии процесса, снижение расхода рабочего газа), так и источников ионов для дополнительной ионной стимуляции десорбции продуктов взаимодействия. Что, абсолютно справедливо и для смеси фреон/аргон в условиях высокочастотного разряда.

При малых мощностях смещения 0–50 Вт лимитирующей стадией процесса плазмохимического взаимодействия предположительно является диффузия атомов хлора и фтора к поверхности твердой фазы, либо деструкция маскирующего поверхностного слоя. Качественно аналогичная

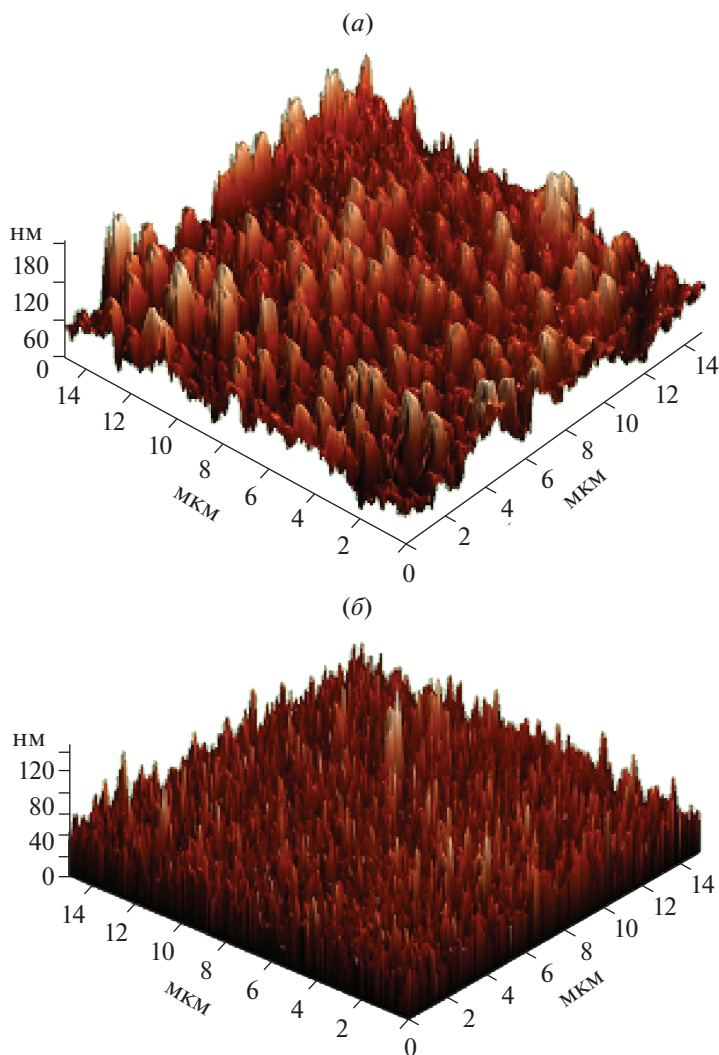


Рис. 3. Поверхность GaAs, обработанного в ВЧ разряде. $W_{rf} = 950$ Вт, $P = 1.4$ мТорр, $\tau_{обр.}$ 90 с: (а) – фреона R-12. $\sigma = 28$ нм, $W_{bias} = 300$ Вт; (б) – смеси фреона R-12 + Ar. $\sigma = 10$ нм, $W_{bias} = 300$ Вт.

ситуация имеет место, например, при травлении меди в плазме хлора [10] в диапазоне температур, не обеспечивающих очистку поверхности от продуктов взаимодействия.

Увеличение мощности смещения до 200–300 Вт, как и в ситуации с “чистым” фреоном, и сопутствующий этому рост энергии физически активных частиц приводит к росту скоростей ионно-стимулированной десорбции продуктов взаимодействия и деструкции приповерхностных слоев материала, обеспечивающих полную очистку обрабатываемой поверхности. При этом, ожидается более высокая скорость травления, чем в смеси фреона с аргоном без подачи смещения и вследствие этого большая шероховатость поверхности полупроводника, при тех же временах обработки. При тех же 90 с обработки величина σ составляет ~ 10 нм, что почти в 2 раза больше величины ше-

роховатости травления без подачи потенциала на подложкодержатель.

В качестве примера поверхности полупроводниковой структуры, следует привести две микрофотографии топологии GaAs полученных после плазменной обработки в “чистом” фреоне и смеси фреон/аргон рис. 3.

Эти данные качественно сопоставимы с данными полученными для “чистого” HCl и его смеси с Ar в условиях тлеющего разряда постоянного тока, что позволяет говорить о плазме фреона R-12 и смеси R-12 + Ar, как о весьма эффективном инструменте плазменного травления GaAs, при сохранении качества поверхности свойственной хлороводородной химии.

Данные о качестве поверхности (шероховатости поверхности) арсенида галлия после высокочастотного травления во фреоне R-12 и его смеси

Таблица 2. Зависимость шероховатости поверхности (σ) от времени травления в “чистом” фреоне R-12 и в смеси фреона с аргоном (R-12/Ar), при отсутствии и наличии потенциала смещения

R-12			
$W_{rf} = 950 \text{ Вт}, W_{bias} = 0 \text{ Вт}$		$W_{rf} = 950 \text{ Вт}, W_{bias} = 300 \text{ Вт}$	
t, с	σ , нм	t, с	σ , нм
30	7	30	20
90	11	90	28
150	14	150	65

R-12/Ar			
$W_{rf} = 950 \text{ Вт}, W_{bias} = 0 \text{ Вт}$		$W_{rf} = 950 \text{ Вт}, W_{bias} = 300 \text{ Вт}$	
t, с	σ , нм	t, с	σ , нм
30	3.5	30	3.7
90	6	90	10
150	10	150	41

с аргоном, в зависимости от времени, при наличии смещения и при его отсутствии приведены в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате экспериментов проведено сравнительное исследование качества поверхности арсенида галлия после травления в плазме смесей HCl/Ar, HCl/Cl₂, HCl/H₂. Плазма хлороводорода и его смесей позволяет проводить травление с лучшей равномерностью и чистотой процесса, чем плазма “чистого” хлора или хлороводорода. Изучено влияние условий травления и состава смесей на качество обрабатываемых поверхностей. Показано, что оптимальное сочетание скорости травления и шероховатости поверхности достигается в смеси хлористого водорода с аргоном. В смесях с водородом скорости травления слишком малы при хорошем качестве поверхности, а в смесях с хлором из-за больших скоростей травления шероховатость поверхности превышает допустимые в технологии значения.

ВЧ разряд, инициированный в газовой среде фреона R-12, а также смеси фреона с аргоном является эффективным инструментом для размерного структурирования поверхности арсенида галлия, балансируя между приемлемыми в технологии скоростями травления, чистотой процесса и равномерной поверхностью образца. При этом показано, что увеличение мощности смещения до 200–300 Вт и сопутствующий этому рост энергии физически активных частиц приводит к росту скоростей ионно-стимулированной десорбции продуктов взаимодействия и деструкции приповерхностных слоев материала, обеспечи-

вающих активную очистку обрабатываемой поверхности полупроводника. Средняя шероховатость образцов в исследованном диапазоне параметров составила от 3.5 до 65 нм, в зависимости от типа плазмообразующего газа. Таким образом, регулируя время обработки, мощность потенциала смещения и тип плазменной среды, можно определять качество топологии платины полупроводника.

В итоге, плазменный разряд как смесей HCl/Ar, HCl/Cl₂, HCl/H₂, так и фреона и его смеси с аргоном, является перспективным инструментом и может быть эффективно использован в технологии формирования топологии и функциональных слоев микро и нанoeлектроники. Регулируя такие параметры как время обработки, процентный состав плазмообразующей смеси, мощность потенциала смещения, можно определять качество будущей полупроводниковой структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники: уч. для студ. вузов по спец. электронной техники. СПб.: Лань, 2001. 368 с.
2. Дунаев А.В., Пивоваренко С.А., Семенова О.А., Капинос С.П., Ефремов А.М., Светцов В.И. Кинетика и механизмы плазмохимического травления GaAs в хлоре и хлороводороде // Физика и химия обработки материалов. 2010. № 6. С. 42–46.
3. Дунаев А.В., Пивоваренко С.А., Ефремов А.М., Светцов В.И. Спектральное исследование травления арсенида галлия в плазме HCl // Микроэлектроника. 2011. Т. 40. № 6. С. 413–417.
4. Дунаев А.В., Мушин Д.Б. Травление GaAs в плазме смеси фреона R-12 с аргоном (CCl₂F₂/Ar) // Микроэлектроника. 2019. Т. 48. № 1. С. 38–46.
5. Корякин Ю.В., Ангелов И.И. Чистые химические вещества. М.: Химия, 1974. 408 с.
6. Дунаев А.В., Капинос С.П., Пивоваренко С.А., Ефремов А.М., Светцов В.И. Нанотехника. 2012. № 1(29). С. 93–95.
7. Dale E., Ibbotson D.E. Plasma and gaseous etching of compounds of groups 3–5 // Pure and Appl. Chem. 1988. V. 60. № 5. P. 703.
8. Gillis H.P., Choutov D.A., Martin K.P., Song Li. Low energy electron-enhanced etching of GaAs (100) in a chlorine/hydrogen dc plasma // App. Phys. Lett. 1996. № 68. P. 2475–2477.
9. Rawal D.S., Sehgal B.K., Muralidharan R., Malik H.K. Experimental Study of the Influence of Process Pressure and Gas Composition on GaAs Etching Characteristics in Cl₂/BCl₃-Based Inductively Coupled Plasma // Plasma Science and Technology. 2011. V. 13. № 2. P. 223–229.
10. Efremov A.M., Pivovarenok S.A., Svetsov V.I. Kinetics and Mechanism of Cl₂ or HCl Plasma Etching of Copper // Thin Films. 2007. V. 36. № 6. P. 358–365.