

ТРУДЫ

РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ
НАУК

ФИЗИКО-
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

ISSN 0868-7129

ФТИАН

Том 27

КВАНТОВЫЕ
КОМПЬЮТЕРЫ,
МИКРО-
И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

физика, технология, диагностика
и моделирование

НАУКА

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Д.А. Свинцов, М.К. Руденко, А.Б. Немцов, А. Пильгун, И.А. Семенухин, Л.Е. Федичкин, В.В. Вьюрков, К.В. Руденко</i> Низкоразмерные пролетные диоды и транзисторы для генерации и детектирования терагерцового излучения	5
<i>М.К. Руденко, Д.А. Свинцов, С.Н. Филиппов, В.В. Вьюрков</i> Поведение одноэлектронных солитонов вблизи металлической поверхности в магнитном поле	18
<i>А.В. Цуканов, И.Ю. Катеев</i> Источник терагерцовых фотонов на квантовых точках в микрорезонаторе, интегрированный в квантовый чип	28
<i>А.В. Мяконых, А.Е. Рогожин, А.А. Татаринцев, К.В. Руденко, О.П. Гуцин</i> Технологии формирования затворного HkMG-стека с MIPS-структурой для МДП-транзистора с критическими размерами 32/28 нм	42
<i>А.В. Мяконых, А.А. Татаринцев, К.В. Руденко</i> Электронная литография и анизотропное плазмохимическое травление кремниевых FIN-структур для FINFET и SiNW транзисторов с размерами 11–22 нм	59
<i>Ф.А. Сидоров, А.В. Молчанова, А.Е. Рогожин</i> Двухслойные диэлектрические стеки для затворных структур современных МОП транзисторов	66
<i>И.Э. Клементе, А.В. Мяконых</i> Применение адсорбционной эллипсометрической порометрии для исследования пленок пористых диэлектриков с ультранизкой диэлектрической проницаемостью	74
<i>В.П. Кудря, Ю.П. Маишев</i> Физические принципы диагностики пучков быстрых нейтральных частиц. II. Методы определения полного потока частиц в пучке	89
<i>Т.М. Махвиладзе, М.Е. Сарычев</i> Теория электромиграционной неустойчивости границы соединенных проводящих материалов	99
<i>Т.М. Махвиладзе, М.Е. Сарычев</i> Исследование условий изменения формы интерфейсов проводящих микроструктур под действием электрического тока	107
<i>А.С. Шумилов, И.И. Амиров, В.Ф. Лукичев</i> Моделирование травления высокоаспектных канавок в кремнии в хлорной плазме	118

А.С. ШУМИЛОВ¹, И.И. АМИРОВ¹, В.Ф. ЛУКИЧЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОАСПЕКТНЫХ КАНАВОК В КРЕМНИИ В ХЛОРНОЙ ПЛАЗМЕ

¹ Ярославский филиал Физико-технологического института РАН

1. Введение

Моделирование плазмохимических процессов травления микро- и наноструктур (МНС) является неотъемлемым этапом разработки таких процессов в технологии нанoeлектроники и наномикросистемной техники [1–3]. В настоящее время разработаны различные методы моделирования травления Si, SiO₂ в хлор- и фторсодержащей плазме [4–20]. Из них наиболее распространенным является метод на основе клеточного представления профиля и Монте-Карло метода для задания потока частиц [8–10, 12–20]. На его основе было проведено моделирование травления канавок с высоким аспектным отношением (АО) (отношением глубины канавки к ее ширине). Такие высокоаспектные (ВА) канавки используются в технологии изготовления интегральных схем и для изготовления различных кремниевых элементов микроэлектромеханических систем (МЭМС).

В наших работах по моделированию травления ВА канавок в Si в хлорсодержащей плазме с АО ~ 20 [19, 20] была показана эволюция профиля глубоких канавок в зависимости от двух основных параметров, которые обычно варьируют при разработке таких процессов, – энергия падающих ионов и отношение потоков ионов и радикалов $R = \Gamma(\text{Cl})/\Gamma(\text{Cl}^+/\text{Ag}^+)$ [21]. Последний параметр определяется давлением и содержанием Ag в смеси и изменялся в диапазоне от 3 до 300. Такой широкий диапазон изменения R можно получить в плотной плазме ВЧИ разряда путем разбавления ее аргоном. Добавка Ag в плазму Cl₂ с целью уменьшения R используется в плазменной технологии травления интегральных схем [3, 13]. Моделирование травления Si в плазме Cl₂/Ag представляет также большой интерес с точки зрения организации процесса травления наноструктур с атомарным разрешением [22].

Результаты моделирования находились в хорошем согласии с имеющимися экспериментальными данными по травлению канавок с относительно низким аспектным отношением (АО < 5) [19]. Было показано влияние коэффициента

пересадения распыленных частиц на профиль канавки [19]. При моделировании наблюдались различные эффекты, возникающие при травлении таких структур, — это бочкообразный вид канавки (bowing), локальные затравы на дне канавки (microtrenching), а также ее сужение. Моделирование травления канавочных структур до более высокого АО показало, что при достижении $AO \sim 10-15$ профиль канавки становится неровным и возникает эффект изгиба канавки [20]. В данной статье приведен анализ факторов, влияющих на профиль и скорость травления ВА канавок, результаты исследования аспектнозависимого и аспектнонезависимого травления ВА канавок в плазме Cl_2/Ar .

2. Краткое описание метода моделирования. Верификация метода

Метод моделирования основывался на 2D методе ячеек для представления профиля и расчета химических реакций в них, методе Монте-Карло для задания потока частиц плазмы и модели взаимодействия плазмы с поверхностью материала. Модель взаимодействия включала основные физико-химические процессы, происходящие на поверхности Si при плазмохимическом травлении. Подробно метод моделирования представлен в [12, 19].

В хлорной плазме анизотропное травление Si обусловлено образованием на боковых стенках канавки травления пассивирующего, защитного слоя $SiCl_x$. Травление Si происходит только на дне канавки, где пассивирующего слоя нет в результате ионно-стимулированного, ионно-химического и физического его распыления ионами Cl_2^+ , Cl^+ , Ar^+ . На дне канавки в процессе травления присутствует только реакционный слой из $SiCl_x$ молекул, толщина которого составляла 2–3 нм [8]. Исходя из этого размеры ячеек были выбраны равными 2.5 нм. Модель включала следующие процессы взаимодействия плазма–поверхность:

- 1) ионно-стимулированные реакции взаимодействия Si, $SiCl_x$ ($x = 1-3$) с атомами Cl с образованием летучих молекул $SiCl_4$;
- 2) ионно-химическое травление и физическое распыление поверхностных соединений $SiCl_x$ ($x = 0-4$) ионами Cl^+ и Ar^+ ;
- 3) пересадение на стенки и дно канавки распыленных соединений $SiCl_x$.

Основными параметрами моделирования являлись: 1) вероятности ионно-стимулированных реакций атомов Cl с Si; 2) пороговая энергия и коэффициенты ионно-химического травления и физического распыления, зависящие от угла падения и энергии ионов; 3) функции выхода продуктов распыления от угла падения (ФУР); 4) функция углового распределения ионов по энергии; 5) вероятности прилипания распыленных атомов материала. Угловое распределение отраженных радикалов с поверхности имело вид косинусного или диффузного распределения [16].

На первом шаге моделирования при выпадении радикала Cl определялся угол и координаты его начальной траектории движения. При попадании его в ячейку проводился расчет реакций с вероятностями, представленными в таблице 1. Удаление ячейки происходило при уменьшении количества атомов Si в ней до минимального значения. Атомы Si удалялись из ячейки в результате реакций ионно-стимулированного и ионно-химического травления, а также физического распыления. Существует и другой подход к расчету продуктов реакций в ячейках [8–10, 18]. Он использовался нами в предыдущих работах при моделировании и Bosch-процесса [12, 15]. Основное отличие такого подхода от

предлагаемого в том, что атомы фтора и кремния в ячейках хранились отдельно, а не в виде соединений. Для приближенной оценки вероятного процента количества соединений SiCl_x в ячейке используется специальная формула на основе валентности атомов [18]. Расчет баланса частиц в ячейке при этом становится более простым, но теряется информация о составе реакционного слоя.

2.1. Ионно-стимулированное травление Si атомами Cl

В плазме Cl_2/Ag при взаимодействии атомов Cl с Si на его поверхности образовывался реакционный слой, содержащий соединения SiCl , SiCl_2 , SiCl_3 . Вероятность реакции атомов, радикалов Cl с атомами поверхности Si в хлорсодержащей плазме является высокой вследствие активации поверхности ионами Cl^+ или Ag^+ . Согласно [9, 23], вероятности реакций могли изменяться в диапазоне 0.4–0.9. При моделировании рассматривали три ионно-стимулированные реакции атомов Cl с хлоридами Si и одну реакцию с атомами Si (табл. 1, реакции 1–4). Схема реакций была аналогична схеме, приведенной в [6, 16]. С целью проверки чувствительности метода к параметрам модели моделирование проводили при нескольких значениях вероятности реакций атомов Cl с SiCl_x ($x = 0-3$) (табл. 1, варианты А, Б, В).

2.2. Ионно-химическое травление и физическое распыление Si ионами Cl^+ и Ag^+

При столкновении ионов Cl^+ с поверхностью Si происходила активация поверхности, и при этом они сами, уже в виде «горячих» атомов, вступали в реакции с высокой вероятностью с атомами ячейки. Реакции такого ионно-химического травления представлены в таблице 1 (реакции 5–7). Их вероятности были заданы в соответствии с [6, 14].

Кроме этого, ионы Cl^+ , а также Ag^+ усиливали травление через механизм физического распыления Si и слабосвязанных SiCl_x (табл. 1, реакции 8–11). Коэффициенты физического распыления SiCl_x ионами Cl^+ и Ag^+ считали одинаковыми, так как массы ионов близки по величине. При попадании в ячейку иона с энергией выше порога распыления в ней с определенной вероятностью происходило удаление атомов материала. При достижении минимально допустимого значения атомов материала ячейка удалялась. Остаток содержимого удаленной ячейки передавался пропорционально ее соседям [12]. В случае отражения ионы имели зеркально-диффузное угловое распределение с радиусом отклонения до 18° [7, 24]. Вероятность отражения иона от поверхности зависела от состава ячейки поверхности, угла падения и энергии иона и рассчитывалась методом Монте-Карло согласно [8, 9]. После отражения ион нейтрализовался. Дальнейшая траектория движения этих «горячих» атомов Cl, Ag рассчитывалась до следующего столкновения с поверхностью. При столкновении с поверхностью ион передавал ей часть своей энергии, при этом энергия иона каждый раз уменьшалась.

Обычно полагают, что существует пороговый угол ($60-65^\circ$), при котором вероятность потери энергии ионом претерпевает резкое изменение [6, 8]. При малых углах падения отраженные частицы не принимали дальнейшего участие

Таблица 1. Схема реакций и коэффициенты взаимодействия частиц плазмы Cl_2/Ar с поверхностью SiCl_x ($x = 0-3$)

Реакция	Реакции Cl с активированной поверхностью SiCl_x ($x = 0-3$)	Вариант			Источник
		А	Б	В	
1	$\text{Si}_{(s)} + \text{Cl}_{(g)} \rightarrow \text{SiCl}_{(s)}$	0.99 ^{a)}	0.75 ^{б)}	0.4	а) [6] б) [14]
2	$\text{SiCl}_{(s)} + \text{Cl}_{(g)} \rightarrow \text{SiCl}_{2(s)}$	0.2 ^{a)}	0.15	0.08	
3	$\text{SiCl}_{2(s)} + \text{Cl}_{(g)} \rightarrow \text{SiCl}_{3(s)}$	0.15 ^{a)}	0.11	0.06	
4	$\text{SiCl}_{3(s)} + \text{Cl}_{(g)} \rightarrow \text{SiCl}_{4(g)} \uparrow$	0.001 ^{a)}	0.007	0.004	
<i>Ионно-химическое травление Si</i>		$Y_{i-as} \approx K_{i-as}(\sqrt{E_i} - \sqrt{E_{th}})$, $E_{th} = 12 \text{ эВ}$			
5	$\text{SiCl}_{(s)} \xrightarrow{\text{Cl}^+} \text{SiCl}_{2(g)} \uparrow$	$K_{i-as} = 0.22$			[6, 14]
6	$\text{SiCl}_{2(s)} + \text{Si} \xrightarrow{\text{Cl}^+} \text{SiCl}_{2(g)} \uparrow + \text{SiCl}_{(s)}$	$K_{i-as} = 0.27$			
7	$\text{SiCl}_{3(s)} \xrightarrow{\text{Cl}^+} \text{SiCl}_{4(g)} \uparrow$	$K_{i-as} = 0.32$			
<i>Физическое распыление Si</i>		$Y_{sp} \approx K_{sp}(\sqrt{E_i} - \sqrt{E_{th}})$			
8	$\text{Si} \xrightarrow{\text{Cl}^+, \text{Ar}^+} \text{Si} \uparrow$	$K_{spSi} = 0.04$			[6, 14, 16]
9	$\text{SiCl}_{(s)} \xrightarrow{\text{Cl}^+, \text{Ar}^+} \text{SiCl}_{(g)} \uparrow$	$K_{spSiCl} = 0.08$			
10	$\text{SiCl}_{2(s)} \xrightarrow{\text{Cl}^+, \text{Ar}^+} \text{SiCl}_{2(g)} \uparrow$	$K_{spSiCl_2} = 0.1$			
11	$\text{SiCl}_{3(s)} \xrightarrow{\text{Cl}^+, \text{Ar}^+} \text{SiCl}_{3(g)} \uparrow$	$K_{spSiCl_3} = 0.14$			
<i>Переосаждение</i>		Вариант			
		А	Б	В	
12	$\text{Si}_{(g)} \rightarrow \text{Si}_{(s)}$	0.3	0.6		а) [5, 16] б) [6, 16]
13	$\text{Si}_{(s)} + \text{SiCl}_{(g)} \rightarrow \text{Si}_{(s)} + \text{SiCl}_{(s)}$	0.15	0.3		
14	$\text{SiCl}_{(s)} + \text{SiCl}_{(g)} \rightarrow 2\text{SiCl}_{(s)}$	0.06	0.11		
15	$\text{SiCl}_{2(s)} + \text{SiCl}_{(g)} \rightarrow \text{SiCl}_{2(s)} + \text{SiCl}_{(s)}$	0.02	0.04		
16	$\text{SiCl}_{3(s)} + \text{SiCl}_{(g)} \rightarrow \text{SiCl}_{3(s)} + \text{SiCl}_{(s)}$	0.006	0.013		
17	$\text{Si}_{(s)} + \text{SiCl}_{2(g)} \rightarrow \text{Si}_{(s)} + \text{SiCl}_{2(s)}$	0.1	0.2 ^{a)}	0.8 ^{б)}	
18	$\text{SiCl}_{(s)} + \text{SiCl}_{2(g)} \rightarrow \text{SiCl}_{(s)} + \text{SiCl}_{2(s)}$	0.04	0.08 ^{a)}	0.5 ^{б)}	
19	$\text{SiCl}_{2(s)} + \text{SiCl}_{2(g)} \rightarrow \text{SiCl}_{2(s)} + \text{SiCl}_{2(s)}$	0.015	0.03 ^{a)}	0.3 ^{б)}	
20	$\text{SiCl}_{3(s)} + \text{SiCl}_{2(g)} \rightarrow \text{SiCl}_{3(s)} + \text{SiCl}_{2(s)}$	0.005	0.01 ^{a)}	0.1 ^{б)}	

в распылении, так как их энергия после столкновения уменьшалась и становилась ниже пороговой. Однако отраженные частицы, падающие под скользящими углами, принимали участие в реакциях, так как коэффициент передачи их энергии поверхности является низким. Функция сохранения энергии Cl^+ , аналогично [24], была пропорциональна $\cos(\varphi)$, для $\text{Ar}^+ - \cos(\varphi)^2$. При попадании на поверхность под прямыми углами ионы теряли до 95% своей энергии, в то время как под скользящими углами только до 5–10%.

Выбор вероятности реакции атомов Si и ионов Cl^+ с Si при ионно-стимулированном и ионно-химическом травлении Si осуществлялся на основе согласия полученных коэффициентов выхода атомов Si на один ион от энергии ионов, а также получаемого профиля неглубокой канавки ($\text{AO} = 5$) с экспериментом [25, 26]. Выход атомов Si на один ион Cl^+ (Ar^+) определялся выражением

$$Y_{i-\text{as}}(E_i, \varphi) = f_{i-\text{as}}(E_i) \times g_{i-\text{as}}(\varphi) \times h(N_i), \quad (1)$$

где $f_{i-\text{as}}(E_i)$ – функция зависимости коэффициента выхода SiCl_x от энергии иона при перпендикулярном его падении; $g_{i-\text{as}}(\varphi)$ – функция угловой зависимости коэффициента распыления; $h(N_i)$ – концентрация i -й компоненты в ячейке.

Зависимость коэффициента выхода атомов Si от энергии ионов была пропорциональна $\sqrt{E_i}$, согласно формуле (2) [6, 27]:

$$f_{i-\text{as}}(E_i) = K_{i-\text{as}}(\sqrt{E_i} - \sqrt{E_{\text{th}}}), \quad (2)$$

где E_{th} – пороговая энергия ионно-стимулированного травления SiCl_x ; $K_{i-\text{as}}$ – коэффициент.

Пороговая энергия E_{th} равнялась 10–12 эВ [6, 10, 14]. Линейный коэффициент $K_{i-\text{as}}$ являлся калибровочным и подбирался исходя из экспериментальных и литературных данных [6, 14]. Угловую зависимость $g_{i-\text{as}}(\varphi)$ коэффициента выхода атомов Si задавали согласно [11]. Общий выход продуктов травления был равен сумме коэффициентов выхода компонентов SiCl_x по всем реакциям. Величины коэффициентов скорости реакций в модели разыгрывались вероятностно методом Монте-Карло, статистически обеспечивая итоговую величину выхода атомов Si.

Коэффициент выхода атомов Si на один ион в результате физического распыления SiCl_x ($x = 0-3$) ионами Cl^+ и Ar^+ (Y_{sp}) рассчитывали согласно [8] по аналогичным (1) и (2) формулам. Подробно описание расчета коэффициентов ионно-химического травления Si и физического распыления SiCl_x приведено в [19]. Их вклад в травление значителен при высоких энергиях ионов (> 100 эВ) и малом R .

2.3. Влияние переосаждения Si, SiCl, SiCl₂ на профиль травления канавки

В результате процессов ионно-стимулированного, ионно-химического травления и физического распыления Si со дна канавки удалялись радикалы SiCl_x ($x = 0-3$). Эти радикалы могли оказывать существенное влияние на развитие профиля канавки, так как в процессе выхода из канавки они претерпевали многократные столкновения и осаждались на боковых стенках. Для учета

влияния данного процесса необходимо знать функцию их угла вылета и вероятность прилипания к хлорированной поверхности. Ввиду недостаточности экспериментальных данных в Cl_2 плазме при моделировании распыления Si вид функции брали близким к косинусоидальному [24]. Схема реакций и коэффициенты прилипания частиц Si, SiCl, SiCl₂ к хлорированной поверхности Si приведены в табл. 1. Переосаждение частиц SiCl₃ в модели не рассматривали по причине их высокой летучести. Данные по коэффициенту прилипания SiCl₂ в литературных источниках разные: 0.1–0.8 в зависимости от степени хлорирования поверхности [6]; 0.05 для радикалов SiCl₂ и SiCl₃ [10, 16]; 0.5 [9], 0.3 на чистый Si и 0.05–0.01 на хлорированную поверхность [5]. Ввиду этого в численных экспериментах была проведена проверка модели на чувствительность к данному параметру (табл. 1, переосаждение, варианты А–В).

2.4. Верификация метода моделирования

Моделирование показало, что при $R = 10$ (плазма $\text{Cl}_2 + 90\% \text{Ar}$) при высоких величинах коэффициента прилипания (0.99, 0.75, варианты А и Б) коэффициенты выхода атомов Si на один ион были больше, чем это наблюдалось в эксперименте [4, 7–9]. Результаты моделирования совпадали с экспериментальными данными [28] при вероятности реакции Cl к Si, равной 0.4 (вариант В) (рис. 1, кривая 1). С уменьшением отношения Cl/Cl^+ ($R = 5$) в 2 раза выход атомов Si на один ион уменьшился незначительно (рис. 1, кривая 3). Такая ситуация наблюдалась при низкой энергии ионов ($E_i < 50$ эВ). При $R = 10$, но при высоком содержании аргона в смеси (концентрация аргона в смеси больше 90%), когда потоки ионов Ag^+ и Cl^+ были одинаковыми, выход атомов Si на один ион уменьшился приблизительно в 1.4 раза (рис. 1, кривая 2).

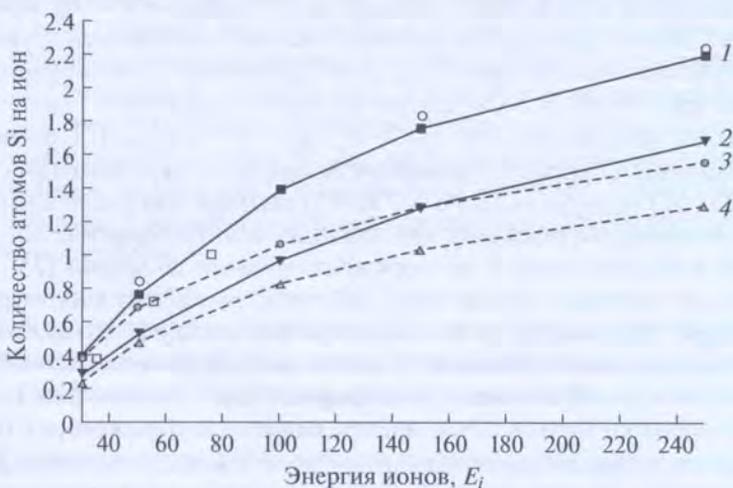


Рис. 1. Зависимость коэффициента выхода атомов Si на один ион от энергии падающих ионов: 1 – плазма Cl/Cl^+ , $R = 10$; 2 – плазма $\text{Cl}/\text{Cl}^+/\text{Ar}^+$, $R = 10$; 3 – плазма Cl/Cl^+ , $R = 5$; 4 – плазма $\text{Cl}/\text{Cl}^+/\text{Ar}^+$, $R = 5$. В случаях 2 и 4 отношение потоков Ag и Cl было 1 : 1. $\Gamma_{\text{Ag}^+} = \Gamma_{\text{Cl}^+} = 1.75 \times 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; кружок – источник [11], квадратик – [5, 18]

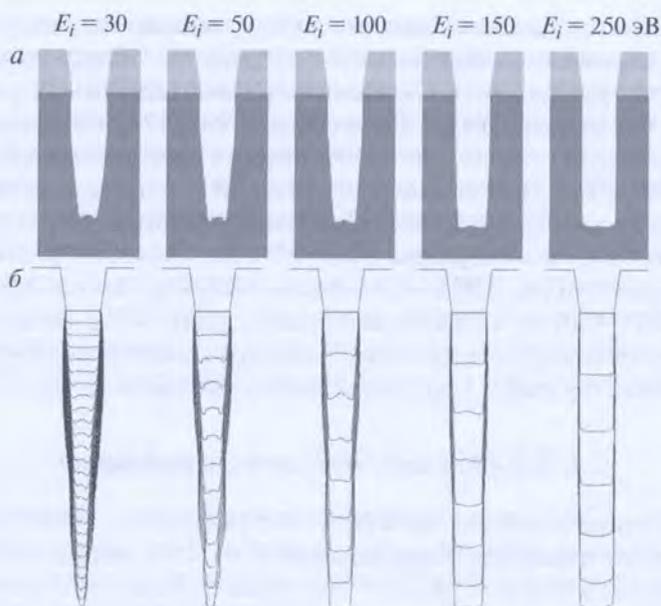


Рис. 2. Профиль канавок в Si, протравленных при разной энергии падающих ионов до аспектного отношения; *a* – АО = 5; *б* – АО = 10; $R = 10$. Шаг профиля 20 с. $\Gamma_{Cl^+} = 3.5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

Разбавление аргоном привело к уменьшению скорости травления Si. С уменьшением потока атомов Cl в 2 раза ($R = 5$) скорость травления Si уменьшалась приблизительно в 1.3 раза (рис. 1, кривые 3 и 4).

Моделирование травления неглубоких канавок (АО = 5) при указанных выше параметрах и отношении потоков Cl/Cl^+ , равном $R = 10$, показало, что скорость травления и профиль канавки сильно изменялись с увеличением энергии падающих ионов (рис. 2, *a*). Для сравнения с экспериментальными данными по травлению Si в Cl_2 плазме [4] плотность потока ионов на поверхность задавали равным $3.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ($j_i = 2.7 \text{ mA/cm}^2$). При такой плотности потока ионов скорость травления Si при низком аспектном отношении канавки (АО < 2) увеличивалась с 162 до 930 нм/мин при увеличении E_i с 30 до 250 эВ. Моделирование показало, что при пониженных энергиях ионов ($E_i = 30, 50$ и 100 эВ) в соответствии с экспериментальными данными [25, 26] происходило сужение канавки. Кроме того, наблюдался эффект микротренчинга – более глубокое травление Si в углах канавки. Этот эффект возникал только при травлении канавок с низким аспектным отношением (АО < 5). Эффект микротренчинга не наблюдался при энергии бомбардирующих ионов выше 150 эВ. Его возникновение объясняется влиянием отраженных от боковых стенок канавок ионов, падающих на них под скользящими углами [25, 26, 29]. Полученные профили моделирования канавок качественно совпадали с экспериментальными данными и результатами моделирования [9, 25]. Более сильное проявление эффекта микротренчинга при низких энергиях объясняется более широким угловым распределением ионов и более сильным хлорированием дна канавки.

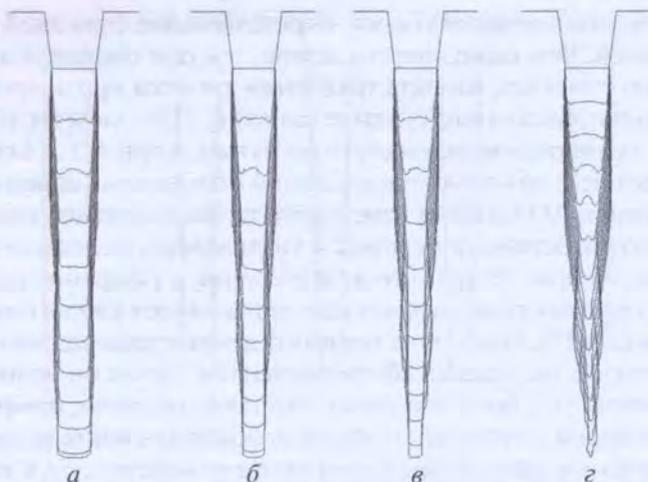


Рис. 3. Профили канавок в Si, полученные при энергии ионов 100 эВ, $R = 10$ в зависимости от коэффициентов прилипания радикалов SiCl_x : *a* – без переосаждения; *б* – вариант А; *в* – вариант Б; *г* – вариант В (табл. 1, переосаждение). Шаг профиля 20 с. $\Gamma_{\text{Cl}} = 35 \times 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

Представленные на рис. 2 профили травления канавок были получены без учета переосаждения продуктов травления SiCl_x на стенки канавки. Однако фактор переосаждения необходимо всегда учитывать при моделировании профиля травления. Влияние переосаждения изучали, варьируя коэффициенты прилипания пассивирующих радикалов (табл. 1, варианты А–В, реакции 12–20) (рис. 3). В отличие от эксперимента без учета переосаждения (рис. 3, *a*), уже при низких коэффициентах прилипания (А) ширина дна канавки при $\text{AO} = 6$ уменьшилась почти в 2 раза (рис. 3, *б*). Увеличение коэффициентов прилипания еще в 2 раза (вариант Б) приводило к более сильному сужению канавки (рис. 3, *в*). Результат моделирования с коэффициентами прилипания, взятыми из работ [6, 16] (вариант В), представлен на рис. 3, *г*. Канавка сильно сужалась, принимая заостренную форму. Сравнивая результаты моделирования с экспериментальными данными работ [9, 25], можно сделать вывод, что коэффициенты прилипания Si, SiCl , SiCl_2 должны быть низкими. Наилучшее сходство профилей канавок с экспериментальными данными [5] было получено с использованием варианта А.

3. Характеристика травления ВА канавок в плазме Cl_2/Ar в зависимости от энергии ионов и отношения потоков Cl/Cl^+ . Эффекты искажения профиля травления ВА канавок

3.1. Эффект сужения и уширения канавки. Микротренчинг

Моделирование травления более глубоких канавок ($\text{AO} = 0$) показало, что с увеличением глубины происходило уширение канавки в ее середине (bowing effect) (рис. 2, *б*). Уширение канавки объяснялось влиянием ионов, отраженных от противоположных боковых стенок канавки и маски, которые падали на

поверхность под скользящими углами, определяемыми функцией углового распределения ионов. Чем ниже энергия ионов, тем оно шире и тем сильнее этот эффект. Можно отметить, что при травлении канавки при энергии 30–100 эВ после уширения происходило сужение канавки. При энергии 100 эВ вначале дно канавки было плоским, затем стало вогнутым, а при $AO > 5$ снова ровным. Эти изменения также объясняются влиянием отраженных ионов от стенок маски. С увеличением AO канавки изменяется также форма дна канавки.

Эффект микротренчинга исчезает с увеличением аспектного отношения (кроме как при энергии 30 эВ). Его исчезновение и уширение канавки объясняется тем, что в этом случае отраженные ионы падают уже на боковую стенку, а не на дно канавки [7]. Причем на первых стадиях травления микротренчинга не было, так как он не успевал сформироваться. Затем он возникал и снова пропадал. В работе [19] было показано, что такое развитие профиля обусловлено влиянием маски, отражением ионов от боковых стенок канавки. При высоких энергиях ионов эффект микротренчинга не наблюдался. Стенки канавки при $E_i = 250$ эВ были вертикальными. Однако дно канавки с увеличением AO становилось более вогнутым.

Приблизительно такие же профили канавок возникали при их травлении в плазме Cl_2/Ar (~95% Ar), когда в ионном потоке присутствовали как ионы Cl^+ , так и Ar^+ (рис. 4). В этом случае эффект микротренчинга стал менее выраженным при более высоких энергиях и усилился при низких энергиях. Он не наблюдался уже при энергии падающих ионов > 150 эВ. Необходимо отметить, что с увеличением содержания Ar расширение канавки стало более выраженным. Скорость травления Si при этом упала. Коэффициент выхода атомов Si на один ион стал намного ниже (рис. 1, кривая 3). Результаты моделирования свидетельствовали, что основным фактором, влияющим на скорость и профиль канавок, является ионная бомбардировка поверхности. Однако моделирование травления канавки только ионами Cl^+ в режиме чисто ионно-химического травления, когда ионы сами вступают в реакции с атомами Si, показало, что канавки с вертикальными стенками получить нельзя. В этом случае происходило уширение канавки

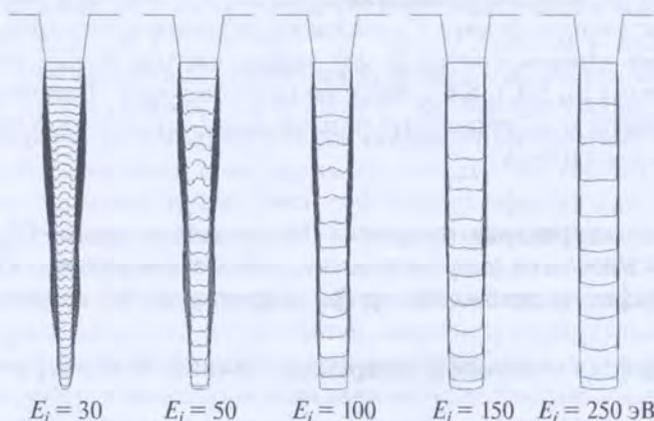


Рис. 4. Вид профиля канавок в Si, протравленных в плазме Cl_2/Ar (95% Ar) при разной энергии падающих ионов (без переосаждения); $R = 10$. Шаг профиля 20 с. $\Gamma_{Cl^+} = 35 \times 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $\Gamma_{Ar^+} = \Gamma_{Cl^+} = 1.75 \times 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

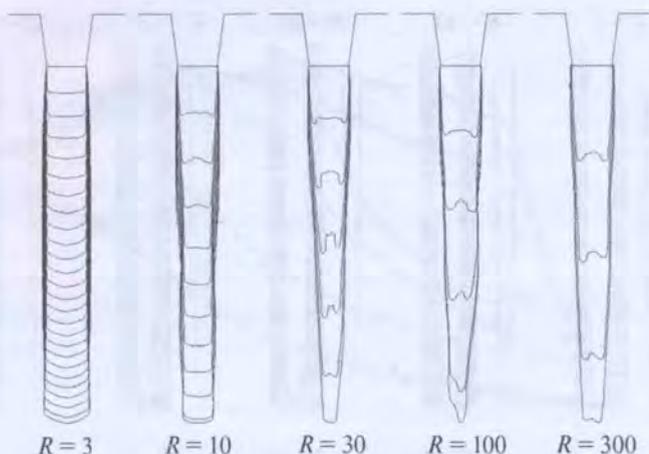


Рис. 5. Профили канавок в кремнии с $AO \sim 10$, протравленных без учета переосаждения $SiCl_x$ ($x = 1-3$) при разном R ; $E_i = 100$ эВ. $\Gamma_{Cl^+} = 3.5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Шаг профиля 20 с

в соответствии с угловым распределением ионного потока. Скорость такого химического распыления была в несколько раз меньше скорости травления в плазме Cl_2/Ag даже при высоком содержании Ag в смеси ($>90\%$).

Моделирование травления глубоких канавок до $AO = 10$ при энергии ионов 100 эВ показало, что с увеличением R от 3 до 300 скорость травления Si увеличилась почти в 4 раза (с 4.4 до 16.8 нм/с). Такие скорости наблюдались в начальный момент времени. Профиль ВА канавки в зависимости от R изменялся различным образом (рис. 5). Изменения касались как наклона стенок, так и формы дна канавки. Даже без учета переосаждения $SiCl_x$ травление канавки при $R > 10$ происходило с ее сужением. При низком R ($R = 3$) стенки канавки были вертикальными, а дно вогнутым. При $R = 10$ стенки канавки были тоже практически вертикальными, но дно канавки стало плоским только при $AO > 5$. У канавок меньшей глубины форма дна искажалась из-за возникновения эффекта микротренчинга. С увеличением AO отраженные от боковых стенок канавок ионы в виде нейтральных частиц фокусировались уже к центру дна канавки. Микротренчи при этом пропадали, и дно становилось плоским. При больших величинах R (30, 100, 300) эффект микротренчинга проявлялся гораздо сильнее. Профиль канавки при этом был другим. Стенки канавки становились наклонными, ширина дна канавки уменьшалась. При $R = 30$ и $AO = 10$ ширина уменьшалась более чем в 2 раза. Дно канавки при этом было ровным.

Таким образом, моделирование показало, что эффект микротренчинга проявляется сильнее с увеличением R при относительно низкой энергии ионов (<100 эВ).

3.2. Влияние энергии ионов на скорость травления и профиль ВА канавок в плазме Cl_2/Ag при разном отношении потоков атомов Cl и ионов

Моделирование травления более глубоких канавок с $AO \sim 20$ при $R = 3-300$ с учетом переосаждения показало, что при энергии ионов 100 эВ сужение канавки начиналось при достижении $AO \sim 10-15$ (рис. 6, а). Особенно

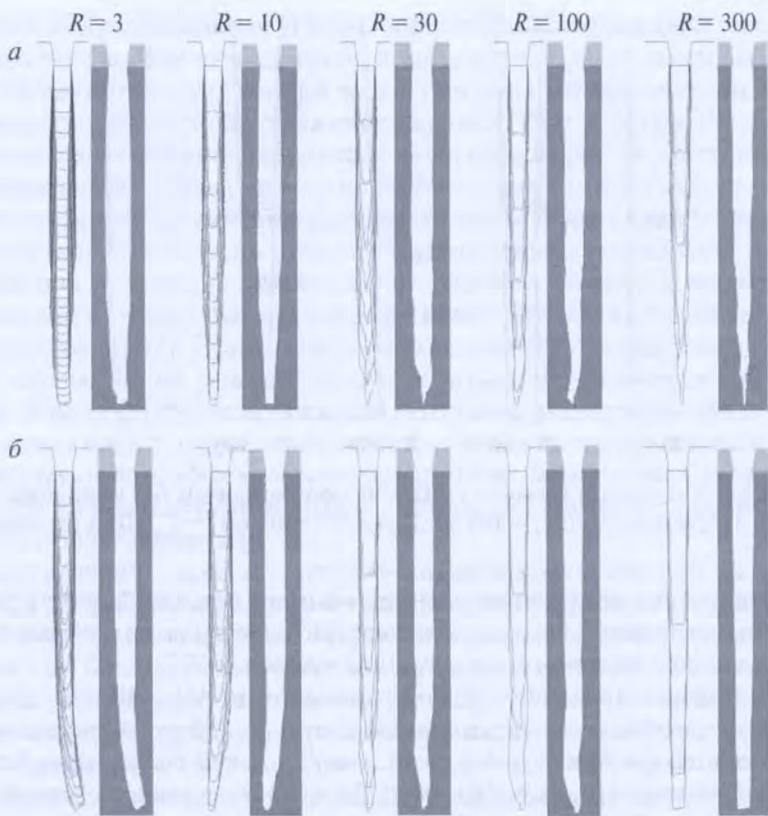


Рис. 6. Профили канавок в Si с АО ~ 20 , протравленных с учетом переосаждения SiCl_x ($x = 1-3$) при разном R и энергии ионов: *a* — $E_i = 100$ эВ; *б* — $E_i = 250$ эВ. $\Gamma_{\text{Cl}^+} = 3.5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Шаг профиля 40 с

сильное сужение канавки наблюдалось при высоком R (100, 300). Стенки ВА канавок при этом были неровными. При низких значениях R (3, 10) наблюдалось некоторое уширение стенок (bowing) в середине канавки и заострение канавки вблизи дна. При энергии ионов 250 эВ и низких значениях R (3, 10) наблюдался эффект изгиба канавки (рис. 6, б). При более высоких величинах R (30, 100) стенки вблизи дна становились волнистыми, а дно канавки заострялось. Канавка с вертикальными стенками была получена при $R = 300$ (рис. 6, б).

При энергии падающих ионов 100 эВ скорость травления канавки увеличивалась от 140 до 800 нм/мин при увеличении R от 3 до 100. Из графика нормированной скорости травления канавок при разном R и энергии ионов 100 эВ (рис. 7, а) следовало, что при $R = 3, 10$ скорость травления канавки уменьшалась с увеличением АО. Такое уменьшение скорости травления обычно наблюдается при травлении глубоких канавок. Оно объясняется уменьшением потока ионов и радикалов на дно канавки с увеличением АО [30]. Однако при более высоком R (20–300) скорость травления даже возрастала с увеличением R .

В некотором диапазоне АО возникал обратный апертурный эффект (ОАЭ). При $R = 300$ он наблюдался до АО = 18. При более высокой энергии ионов, равной 250 эВ, обратный апертурный эффект проявлялся слабее. Он наблюдался

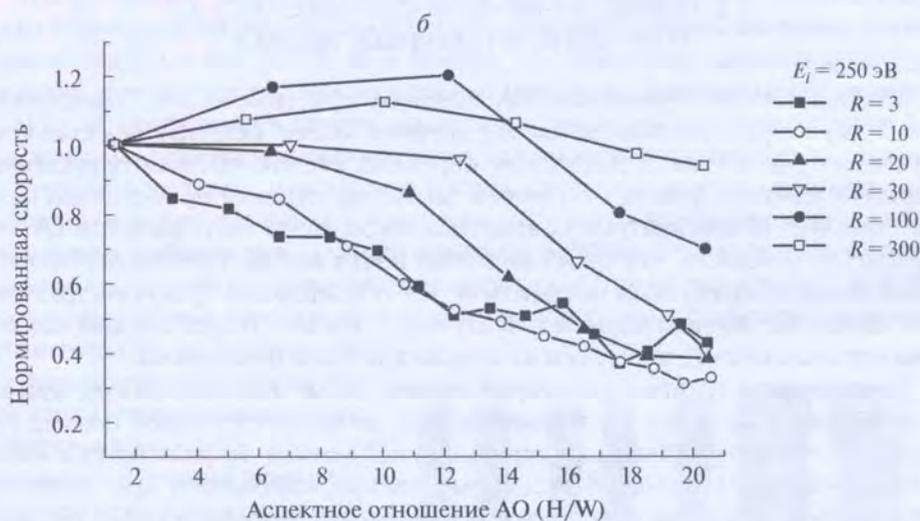
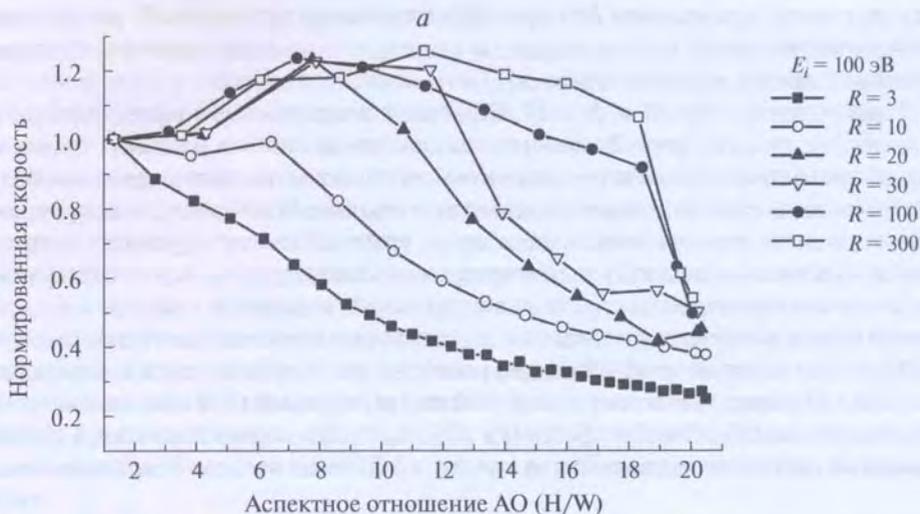


Рис. 7. Зависимость нормированной скорости травления ВА канавок в Si в плазме Cl_2 при $E_i = 100 \text{ эВ}$ (а) и $E_i = 250 \text{ эВ}$ (б) от аспектного отношения при разном R . $\Gamma_{\text{Cl}^+} = 3.5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

только при $R = 100$ и 300 (рис. 7, б). Причем при $R = 100$ он был более выражен. Можно отметить, что при $R = 300$ не наблюдалось искажение профиля канавки. Стенки канавки были вертикальными. При этом скорость травления канавки была практически постоянной, т.е. наблюдалось аспектнонезависимое травление. Его возникновение можно объяснить тем, что отраженные от стенок «горячие» радикалы падают на дно канавки, ускоряя травление. Возникновение обратного апертурного эффекта может быть обусловлено сужением канавки. Ионы, падающие на стенки под скользящими углами, отражаются от них в виде «горячих» атомов, сохраняя значительную часть своей энергии. Отраженные ионы вызывают направленное распыление в районе дна кана-

вок, при этом, при низком АО, формируется микротренчинг. С увеличением АО микротренчинги соединяются, и канавка на дне заостряется. Скорость травления при этом увеличивается.

При энергии 100 эВ и $R > 10$ обратный апертурный эффект проявлялся наиболее сильно (рис. 7, а). Он наблюдался до $AO = 8$. Однако травление происходило при этом с сильным сужением канавки, поэтому делать вывод об аспектнонезависимом травлении или о возникновении обратного апертурного эффекта в этих случаях нельзя. Наоборот, возникновение обратного апертурного эффекта свидетельствует, что травление канавки происходит с ее сужением. Увеличение скорости травления сужающейся канавки связано с фокусировкой ионов в центр ее дна, вызывая заострение канавки. Как было показано в [19], наблюдаемый слабый апертурный эффект проявляется в небольшой разнице в глубине травления узкой (100 нм) и широкой (600 нм) канавок. При энергии ионов 250 эВ и $R = 10$ стенки канавок были вертикальными и глубина травления широкой канавки была только в ~ 1.3 раза больше узкой канавки.

3.3. Искажение профиля канавки с $AO > 15$.

Извилистые и наклонные канавки

Моделирование травления ВА канавки при небольших значениях R ($R = 3, 10$) и сравнительно высокой энергии ионов (250 эВ) показало, что с увеличением АО после появления неровных стенок канавки происходило загибание канавки (рис. 6, б). Причем загибание канавки происходило в разные стороны. Многократное повторение численного эксперимента ($R = 10$, $E_i = 250$ эВ) показало, что загиб возникал почти всегда, причем вероятность загиба влево и вправо была одинаковой. Из 39 повторов в 18 случаях наблюдалось загибание канавки влево и в 18 случаях — вправо. В трех случаях канавки были вертикальными, но стенки их вблизи дна были неровными.

Ранее эффект изгиба с некоторой вероятностью возникал только при моделировании травления ВА канавок в SiO_2 во фторуглеродной плазме [31]. Полагали, что результаты моделирования объясняют эффект изгиба канавки (твист-эффект), который экспериментально наблюдался при травлении SiO_2 . Изгиб канавки был обусловлен искривлением движения ионов в канавке в электрическом поле внутри ее, возникающем в результате случайного встраивания заряда на стенках диэлектрика. Уменьшение вероятности появления искривленных канавок с уменьшением вероятности зарядки как будто подтверждало это объяснение. При моделировании травления ВА канавок в электропроводящем Si в плазме Cl_2 до $AO \sim 15$ такой эффект не наблюдался. Это подтверждало предположение о влиянии зарядки. Ранее такой эффект наблюдался при травлении Si в плазме Cl_2 , когда происходила зарядка дна канавки, а не боковых стенок (notching effect) [32, 33]. При моделировании наклонные канавки получали также, когда травление проводили при наличии диэлектрика на электроде [6]. В этом случае также возникало локальное искажение электрического поля.

Можно отметить, что надежных экспериментальных данных наличия твист-эффекта при травлении ВА канавок нет. Как отмечалось в [34], при травлении SiO_2 такой эффект мог объясняться возникновением несимметрично-го перешейка из фторуглеродной пленки вблизи маски, который появлялся

в результате длительного травления. Кроме того, он мог наблюдаться из-за краевой шероховатости или несимметричности маски. В наших численных экспериментах, в отличие от результатов [31], эффект изгиба канавки Si в плазме Cl_2 возникал с вероятностью почти 95%. Его возникновение не могло быть связано с зарядкой, так как в модели она не учитывалась.

Можно предположить, что возникновение изгиба канавки является артефактом моделирования. Изгиб мог возникать в результате накопления ошибки при длительных расчетах. Ошибка могла накапливаться в результате погрешности расчета траектории движения отраженных частиц с ячейки. Однако такого рода ошибка в результате стохастической природы движения частиц не могла приводить к отклонению движения ионов в определенном направлении. Кроме того, алгоритм построения траектории движения частиц в канавке нами ранее использовался при моделировании травления ВА канавок Si ($\text{AO} > 30$) в Bosch-процессе в плазме $\text{SF}_6/\text{C}_4\text{F}_8$ [12, 15]. Эффект изгиба канавки при этом не наблюдался. Поэтому данный фактор не мог быть причиной его возникновения.

Изгиб канавки возникал также, если моделирование травления осуществляли с использованием первоначально сформированной высокоаспектной Si канавки ($\text{AO} = 10$), рис. 8, а. В этом случае травление канавки до $\text{AO} = 20$ показало, что ее стенки стали неровными (рис. 8, б). Дальнейшее ее травление до $\text{AO} = 30$ приводило к изгибу канавки в произвольную сторону (рис. 8, в). При этом происходило уширение стенок канавки. Эти численные эксперименты свидетельствовали, что эффект изгиба канавки является накопительным эффектом и возникает после проведения достаточно длительных вычислений, когда канавка вблизи дна начинает сужаться, а стенки становятся волнистыми. Его возникновение не было связано с достижением определенного AO . Возникновение изгиба канавки вблизи ее дна может быть обусловлено влиянием отраженных от ее боковых стенок высокоэнергетических атомов хлора, получающихся в результате падения на них под скользящими углами ионов Cl^+ .

Без учета этих отраженных атомов Cl искривление профиля не наблюдалось. Канавка получалась заостренной. В то же время отражение ионов не являлось достаточным условием возникновения искривленного профиля. Моделирование без учета переосаждения SiCl_x приводило

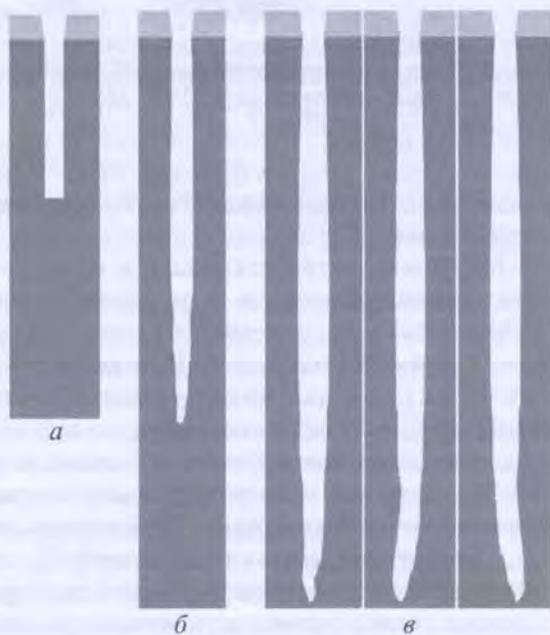


Рис. 8. Профили канавок Si, протравленные начиная с исходного профиля прямоугольной канавки с $\text{AO} = 10$ (а) до $\text{AO} = 20$ (б) и $\text{AO} = 30$ (в). $R = 10$, $\Gamma_{\text{Cl}^+} = 3.5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $E_i = 250 \text{ эВ}$

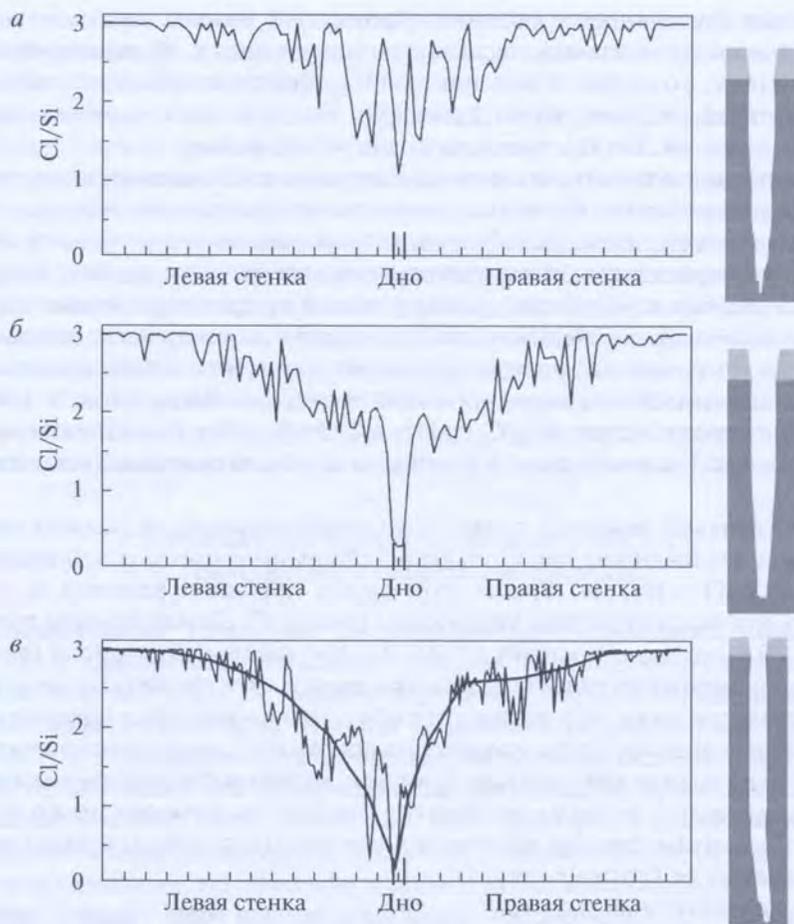


Рис. 9. Относительное содержание Cl/Si в ячейках на дне канавок, полученных при разной энергии падающих ионов: *a* – 50 эВ, АО = 10; *б* – 200 эВ, АО = 10; *в* – 250 эВ, АО = 20. $R = 10$. $\Gamma_{Cl^+} = 3.5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

к ровной вертикальной канавке. Только с учетом этих двух факторов возникал изгиб канавки [20].

Неровность стенок канавки и извилистость профиля вблизи дна ВА канавки можно объяснить флуктуациями концентрации нелетучих продуктов SiCl_x ($x = 1-3$) на ее стенках. Их возникновение обусловлено стохастическим характером падения ионов и радикалов на стенки глубокой канавки, в результате чего в некоторых местах может происходить накопление продуктов SiCl_x . Ионы, падая на их скопления под скользящими углами, будут отражаться и падать на противоположную стенку, вызывая ускорение травления в местах падения. В результате этого рельеф поверхности стенки канавки по мере увеличения ее глубины будет становиться неровным и волнистым.

Расчеты содержания продуктов SiCl_x на дне и стенках канавки с АО = 10 действительно показали наличие больших флуктуаций отношения Cl/Si на боковых стенках канавок, полученных при разной энергии ионов и $R = 10$

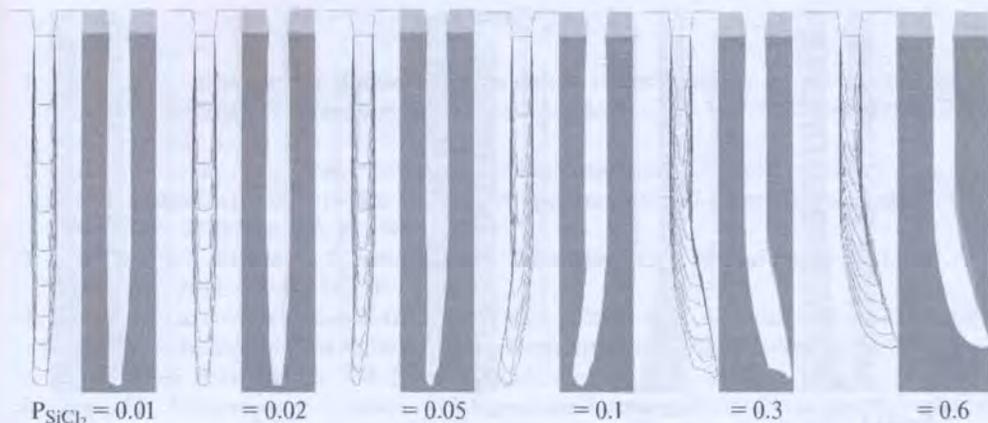


Рис. 10. Профили травления ВА канавки в зависимости от коэффициента прилипания SiCl_x (табл. 1, реакция 17). $E_i = 250$ эВ, $R = 10$

(рис. 9). Они наблюдались при низкой энергии ионов, когда стенки канавки были неровными (рис. 9, а). Содержание Cl/Si на боковых стенках канавки с ровными стенками, полученной при энергии 200 эВ, были значительно меньше (рис. 9, б). На дне канавки их содержание было минимальным. При энергии 250 эВ и $\text{AO} = 20$, когда ВА канавка была изогнутой, также наблюдались значительные флуктуации отношения Cl/Si на стенках (рис. 9, в). Причем они возникали на боковой стенке, противоположной от направления изгиба. Во всех случаях накопление продуктов SiCl_x происходило на стенках канавки вблизи ее вершины. Относительное содержание Cl/Si здесь было максимальным и приближалось к 3. Такое же отношение Cl/Si было получено и в работе [7].

Для определения других факторов, влияющих на изгиб канавки, проводили моделирование их травления в зависимости от коэффициента прилипания SiCl_x . Моделирование показало, что наклонные канавки наблюдались при разной его величине. Коэффициент прилипания SiCl_2 на чистый кремний (см. табл. 1) варьировался в диапазоне от 0.01 до 0.6. При увеличении вероятности прилипания распыленных частиц SiCl_x изгиб канавки усиливался (рис. 10). При вероятности прилипания, близкой к нулю, загиб канавки ослабевает. Ранее было установлено, что пересаживание является неотъемлемым фактором загиба канавки. Данные эксперименты подтверждают это положение.

Извилистый профиль и загиб канавки возникали также при изменении вероятности прилипания атомов хлора от 0.2 до 0.99 (рис. 11). Изгиб канавки наблюдался при всех значениях вероятности прилипания атомов хлора. С уменьшением вероятности скорость травления уменьшалась.

Возникновение изгиба канавки при энергии ионов 250 эВ может свидетельствовать, что этот эффект обусловлен влиянием многократных отражений энергетических частиц от стенок, которые покрыты пассивирующим слоем SiCl_x . Ионы Cl^+ , падающие на хлорированную наклонную боковую стенку канавки, сталкиваясь с ней под скользящим углом, не производят травление, а отражаются в виде быстрого нейтрала с небольшой потерей энергии и падают на противоположную стенку, активируя на ней травление. В точке падения

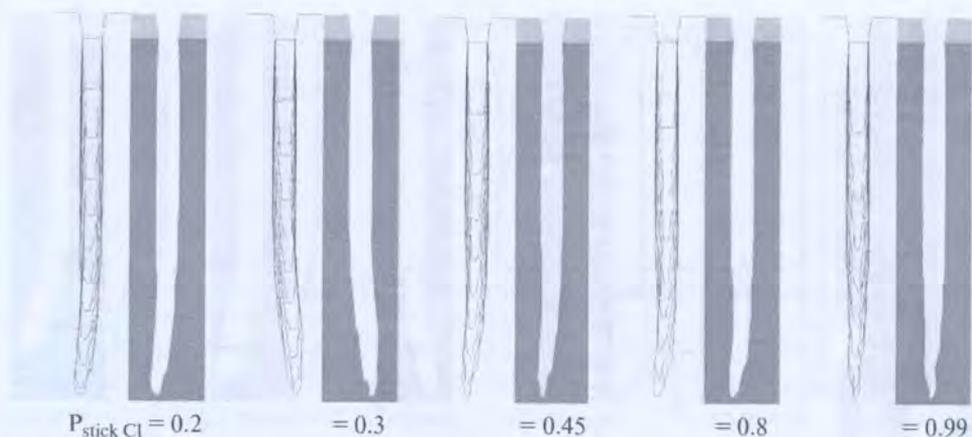


Рис. 11. Профили травления ВА канавки при разной вероятности прилипания радикалов Cl к Si (табл. 1, реакция 1). $E_i = 250$ эВ, $R = 10$

содержание SiCl_x в ячейке уменьшается, что будет способствовать дальнейшему травлению при попадании следующих ионов в окрестность этой ячейки.

Таким образом, может происходить самоформирование канала движения ионов в сторону от вертикального направления. Случайные многократные столкновения ионов со слоем SiCl_x приводят сначала к развитию волнистости стенок, а затем к возникновению искривления канавки. При этом наблюдаются большие флуктуации содержания SiCl_x на стенках канавки как за счет случайного процесса осаждения и переосаждения, так и их распыления ионами.

Заключение

Результаты моделирования травления канавок в Si в плазме Cl_2/Ar в зависимости от энергии ионов и отношения потоков атомов Cl и ионов с помощью разработанного 2D метода моделирования находились в хорошем согласии с экспериментальными данными при АО канавок < 5 . При моделировании травления канавок с более высоким аспектным отношением (АО ~ 20) возникли различные эффекты искажения профиля канавки. С увеличением АО исчезал эффект микротренчинга, но при этом происходило уширение канавки у вершины и сужение канавки вблизи дна. Было обнаружено возникновение искажения профиля ВА канавок с АО > 10 в виде искривления и изгиба почти во всем диапазоне изменения параметров процесса. Эффект возникновения искривления и изгиба канавки мог быть обусловлен влиянием случайных многократных отражений энергетических частиц от стенок канавки, покрытых пассивирующим слоем SiCl_x . В результате этого происходило самоформирование канала движения ионов в сторону от вертикального направления. Было обнаружено, что канавки с АО ~ 20 и почти вертикальными стенками можно получить при $E_i = 250$ эВ и $R = 300$. Травление ВА канавок в таком режиме происходило практически с постоянной скоростью. Полученные результаты численного моделирования ВА канавок (АО ~ 20) в хлорной плазме требуют постановки специальных подтверждающих экспериментов.

1. *Graves D.B., Kushner M.J.* Influence of modeling and simulation on the maturation of plasma technology: Feature evolution and reactor design // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2003. Vol. 21. N 5. P. S152.
2. *Ono K., Ohta H., Eriguchi K.* Plasma-surface interactions for advanced plasma etching processes in nanoscale ULSI device fabrication: A numerical and experimental study // *Thin Solid Films*. 2010. Vol. 518. P. 3461–3468.
3. *Donnelly V.M., Kornblit A.* Plasma etching: Yesterday, today, and tomorrow // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2013. Vol. 31. N 5. P. 050825-1.
4. *Chang S.J., Arnold J.C., Zau H.G.C., Shin H.-S., Sawin H.H.* Kinetic study of low energy argon ion-enhanced plasma etching of polysilicon with atomic/molecular chlorine // *J. Vac. Sci. Technol.* 1997. Vol. 15. N 4. P. 1853–1864.
5. *Chang J.P., Mahorowala A.P., Sawin H.H.* Plasma-surface kinetics and feature profile evolution in chlorine etching of polysilicon // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1998. Vol. 16. N 1. P. 217–224.
6. *Hoekstra R.J., Grapperhaus M.J., Kushner M.J.* Integrated plasma equipment model for polysilicon etch profiles in an inductively coupled plasma reactor with subwafer and superwafer topography // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1997. Vol. 15. N 4. P. 1913–1921.
7. *Abdollahi-Alibeik S., Zheng J., McVittie J.P., Saraswat K.C., Gabriel C.T., Abraham S.C.* Analytical modeling of silicon etch process in high density plasma // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2001. Vol. 19. N 1. P. 179–185.
8. *Mahorowala A.P., Sawin H.H.* Etching of polysilicon in inductively coupled Cl_2 and HBr discharges. II: Simulation of profile evolution using cellular representation of feature composition and Monte-Carlo computation of flux and surface kinetics // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2002. Vol. 20. N 3. P. 1064–1076.
9. *Jin W., Sawin H.H.* Feature profile evolution in high-density plasma etching of silicon with Cl_2 // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2003. Vol. 21. N 4. P. 911–921.
10. *Osano Y., Ono K.* An atomic scale model of multilayer surface reactions and the feature profile evolution during plasma etching // *Jap. J. Appl. Phys.* 2005. Vol. 44. P. 8650–8660.
11. *Belen J.R., Gomez S., Kiehbauch M., Cooperberg D., Aydil E.S.* Feature-scale model of Si etching in SF_6 plasma and comparison with experiments // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2005. Vol. 23. N 1. P. 99–113.
12. *Шумилов А.С., Амиров И.И.* Моделирование формирования глубоких канавок в кремнии в плазмохимическом, циклическом травлении/пассивация процессе // *Микроэлектроника*. 2007. Т. 36. № 4. С. 295–305.
13. *Hoang J., Hsu C.-C., Chang J.P.* Feature profile evolution during shallow trench isolation etch in chlorine-based plasmas. I: Feature scale modeling // *J. Vac. Sci. Technol.* 2008. Vol. B26. N 6. P. 1912–1918.
14. *Guo W., Bai B., Sawin H.H.* Mixing-layer kinetics model for plasma etching and the cellular realization in three-dimensional profile simulator // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2009. Vol. 27. N 2. P. 388–403.
15. *Шумилов С.А., Амиров И.И., Лукичев В.Ф.* Моделирование эффектов формирования глубоких канавок в кремнии в плазмохимическом циклическом процессе // *Микроэлектроника*. 2009. Т. 38. № 6. С. 428–435.
16. *Tinck S., Boullard W., Bogaerts A.* Modeling $\text{Cl}_2/\text{O}_2/\text{Ar}$ inductively coupled plasmas used for silicon etching: effects of SiO_2 chamber wall coating // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2011. Vol. 20. N 4. P. 045012–19.
17. *Zhang S.-Q., Dai Z.-L., Song Y.-H., Wang Y.-N.* Effect of reactant transport on the trench profile evolution for silicon etching in chlorine plasmas // *Vacuum*. 2014. Vol. 99. P. 180–188.
18. *Zhang Y., Huard C., Sriraman S., Belen J., Paterson A., Kushner M.J.* Investigation of feature orientation and consequences of ion tilting during plasma etching with a three-dimensional feature profile simulator // *J. Vac. Sci. Technol.* 2017. Vol. A 35. N 2. P. 021303.

19. Шумилов А.С., Амиров И.И., Лукичев В.Ф. Моделирование травления высокоаспектных канавок в Si в плазме в смеси Cl₂/Ar // Микроэлектроника. 2016. Т. 45. № 3. С. 177–189.
20. Шумилов А.С., Амиров И.И., Лукичев В.Ф. Моделирование профиля травления высокоаспектных канавок в Si в хлорной плазме // Микроэлектроника. 2017. Т. 46. № 5. С. 323–331.
21. Brichon P., Despiau-Pujo E., Mourey O., Joubert O. Key plasma parameters for nanometric precision etching of Si films in chlorine discharges // J. Appl. Phys. 2015. Vol. 118. P. 053303.
22. Agarwal A., Kushner M.J. Plasma atomic layer etching using conventional plasma equipment // J. Vac. Sci. Technol. A. 2009. Vol. 27. N 1. P. 37–50.
23. Cheng C.C., Guinn K.V., Donnelly V.M., Herman I.P. In situ laser-induced thermal desorption studies of the silicon chloride surface layer during silicon etching in high density plasmas of Cl₂ and Cl₂/O₂ mixtures // J. Vac. Sci. Technol. A. 1994. Vol. 12. P. 2630–2638.
24. Liu X.-Y., Daw M.S., Kress J.D., Hanson D.E., Arunachalam V., Coronell D.G., Liu C.-L., Voter A.F. Ion solid surface interactions in ionized copper physical vapor deposition // Thin Solid Films. 2002. Vol. 422. P. 141–149.
25. Lane J.M., Klemens F.P., Bogart K.H.A., Malyshev M.V., Lee J.T.C. Feature evolution during plasma etching. II: Polycrystalline silicon etching // Vac. Sci. Technol. A. 2000. Vol. 18. N 1. P. 188–196.
26. Bogart K.H., Klemens F.P., Malyshev M.V., Coronell J.I., Donnelly V.M., Lee J.T., Lane J.M. Mask charging and profile evolution during chlorine plasma etching of silicon // J. Vac. Sci. Technol. 2000. Vol. A18. N 1. P. 197–206.
27. Steinbruchel C. Universal energy dependence of physical and ion-enhanced chemical etch yields at low ion energy // Appl. Phys. Lett. 1989. Vol. 55. P. 1960–1962.
28. Yin Y., Sawin H.H. Angular etching yields of polysilicon and dielectric materials in Cl₂/Ar and fluorocarbon plasmas // J. Vac. Sci. Technol. 2008. Vol. A 26. N 3. P. 161–173.
29. Hoekstra R.J., Kushner M.J. Microtrenching resulting from specular during chlorine etching of silicon // J. Vac. Sci. Technol. B. 1998. Vol. 16. N 4. P. 2102–2104.
30. Coburn J.W., Winters H.F. Conductance considerations in the reactive ion etching of high aspect ratio features // Appl. Phys. Lett. 1989. Vol. 55. N 26. P. 2730–2732.
31. Wang M., Kushner M.J. High energy electron fluxes in dc-augmented capacitively coupled plasmas. II: Effects on twisting in high aspect ratio etching of dielectrics // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 107. N 2. P. 023309.
32. Arnold J.C., Sawin H.H. Charging of pattern features during plasma etching // J. Appl. Phys. 1991. Vol. 70. N 15. P. 5314–5315.
33. Hwang G.S., Giapis K.P. The influence of surface currents on pattern-dependent charging and notching // J. Appl. Phys. 1998. Vol. 84. N 2. P. 683–689.
34. Miyake M., Negishi N., Izawa M., Yokogawa K., Oyama M., Kanekiyo T. Effects of mask and necking deformation on bowing and twisting in high-aspect-ratio contact hole etching // Jap. J. Appl. Phys. 2009. Vol. 48. P. 08HE01.