

УДК 621.7.08

УПРАВЛЕНИЕ ЭРОЗИЕЙ МАСКИ И КОРРЕКЦИЯ ПРОФИЛЯ СТРУКТУР В АДАПТИРОВАННОМ ПРОЦЕССЕ ГЛУБОКОГО РЕАКТИВНОГО ИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ

© 2024 г. О. В. Морозов*

Ярославский филиал Физико-технологического института им. К.А. Валиева РАН,
НИИЦ “Курчатовский институт” Ярославль, 150067 Россия

*e-mail: moleg1967@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.02.2024

После доработки 14.04.2024

Принята к публикации 14.04.2024

Представлен новый подход к оптимизации циклической процедуры глубокого реактивного ионного травления кремния. Настройка параметров травления проводилась на основе прямых измерений скоростей процессов осаждения и травления в цикле на поверхности окисленного кремния с использованием лазерного интерферометра. Качественный профиль травления при минимальной эрозии SiO_2 -маски (максимальной селективности процесса) достигался при адаптации трехстадийного процесса глубокого реактивного ионного травления по измеренной длительности удаления полимера на дне канавок в кремнии. Установлено, что в течение процесса травления возможна коррекция формы профиля путем изменения параметров глубокого реактивного ионного травления. В результате оптимизации был получен рецепт травления канавок шириной 30 мкм на глубину 350 мкм с углом наклона стенок 0.36° при скорости и селективности процесса — 3.4 мкм/мин и ~400 соответственно. Адаптированный рецепт был успешно применен в технологии изготовления чувствительного элемента микромеханического гироскопа.

Ключевые слова: глубокое реактивное ионное травление кремния, циклическая процедура, профиль травления, селективность, лазерный интерферометр.

DOI: 10.31857/S1028096024110105, EDN: REICAL

ВВЕДЕНИЕ

Глубокое реактивное ионное травление (ГРИТ) кремния в реакторах с индуктивно-связанной плазмой является одним из ключевых процессов в технологиях микро-электро-механических систем (МЭМС). В настоящее время циклическая процедура проведения ГРИТ, известная как Time-Multiplexed Deep Silicon Etching (TMDSE) или Bosch-процесс, является доминирующей в технологиях МЭМС, благодаря возможности анизотропного травления кремния с беспрецедентно высокой производительностью. Идея циклической процедуры анизотропного травления заключается в многократном повторении двух стадий, в которых чередуется осаждение полимера (стадия “осаждения” в C_4F_8 плазме) и реактивное

ионное травление (РИТ) — стадия “травление” в SF_6 плазме [1, 2]. В приложении инерциальных МЭМС для повышения класса точности требуется увеличение массы чувствительного элемента на единицу площади при сохранении условия миниатюрности. Это мотивирует использование толстых слоев кремния (H) и сверхглубокого процесса TMDSE при изготовлении перспективных микроакселерометров ($H = 0.5\text{--}1$ мм) [3, 4] и микрогироскопов ($H = 100\text{--}300$ мкм) [5–10]. Целью сверхглубокого процесса травления является достижение контролируемой формы профиля (прямоугольного сечения) и гладкой поверхности стенок механических компонентов, чтобы обеспечить функциональные качества устройства [11–13].

Трудности управления формой профиля элементов многих конструкций инерциальных МЭМС возникают из-за требования травить канавки с высоким аспектным отношением — $AR = h/w$ (h — глубина травления, w — ширина канавки). Проблема получения прямоугольного, хорошо контролируемого профиля канавок заключается в том, что при достижении некоторого критического значения AR_c , зависящего от параметров TMDSE, продолжение травления сопровождается резким изменением формы профиля (рис. 1а). Это ограничивает максимальную глубину травления (стоп-эффект) по причине уменьшения потока активных частиц из плазмы (ионов и радикалов) на дно канавок с увеличением AR . Одним из путей решения данной проблемы может быть использование более высоких значений энергии ионов на стадии “травление” (усиление режима РИТ) в стандартной двухстадийной процедуре TMDSE [14]. Однако усиление режима РИТ в процессах с фиксированными параметрами стадий приводит к бочкообразной форме профиля в целом (рис. 1б) и образованию повреждений на боковых стенках канавок [15, 16].

Другой подход, продемонстрированный при настройке двухстадийной процедуры сверхглубокого травления (до 1 мм), заключается в непрерывном изменении параметров стадий на протяжении всего процесса TMDSE [17].

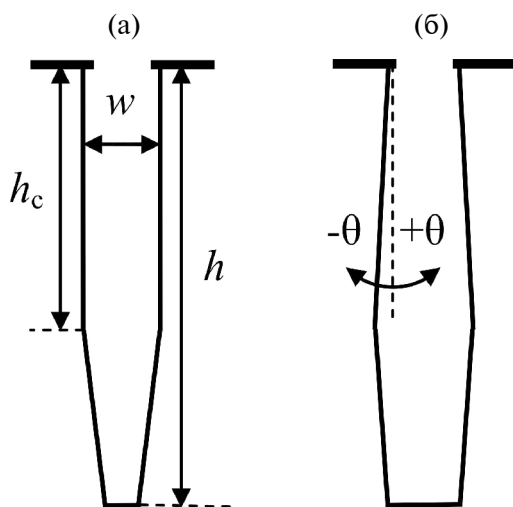


Рис. 1. Схематическое изображение профиля травления разной формы: (а) — вертикальный до критического значения аспектного отношения $AR_c = h_c/w$, (б) — бочкообразный. θ — угол наклона стенок относительно вертикали.

Подстройка последовательности изменения параметров, в частности, обеспечивающих относительное усиление режима РИТ (увеличение энергии ионов и длительности их воздействия в течение стадии “травление”), применялась с целью компенсации уменьшения потока активных частиц на дно канавок. Хотя один рецепт не является оптимальным для любой ширины канавки, подавление стоп-эффекта было достигнуто в диапазоне значений w от 20 мкм ($AR \sim 40$) до 50 мкм ($AR \sim 20$) при небольших отклонениях от идеального прямоугольного профиля.

Применение режима РИТ в течение всей стадии “травление” в двухстадийном процессе TMDSE обуславливает повышенную эрозию стандартных материалов маски (SiO_2 , фоторезист) [17]. В длительных процессах травления необходимо иметь достаточно высокую селективность травления (отношение скорости травления канавок к скорости травления маски) для сохранения маски до момента достижения требуемой глубины. С целью решения проблем контроля профиля и селективности часто применяется оптимизация процедуры TMDSE путем введения дополнительной стадии “удаление” между стадиями “осаждение” и “травление”. Дополнительная стадия обеспечивает целенаправленное применение режима РИТ путем независимой настройки: энергии ионов, плотности ионного потока, давления или состава газовой смеси, для эффективного удаления полимера на дне канавок (стадия “удаление”) [18–22]. Требование к настройке последующей стадии “травление” в режиме высокоскоростного плазмохимического травления (ПХТ) кремния в SF_6 -плазме ограничивается обеспечением сохранности полимера на стенках канавок.

В данной работе представлены результаты разработки трехстадийной процедуры TMDSE для изготовления чувствительного элемента микро-гироскопа в слое кремния толщиной 350 мкм. Проблемы получения процесса с высокой селективностью и профилем травления с вертикальными стенками решались в следующей последовательности. Сначала проводились измерения длительности удаления полимера в базовом режиме РИТ при разных условиях стадии “осаждение”. Затем проводилась оптимизация процедуры TMDSE: во-первых — изменением времени стадии “удаление” в течение процесса травления (коррекция профиля); во-вторых — подстройкой стартового времени стадии “удаление” к измеренной длительности удаления полимера (минимизация эрозии маски).

ЭКСПЕРИМЕНТ

Разработка процесса TMDSE проводилась в реакторе с двумя ВЧ-источниками плазмы, обеспечивающем независимое управление плотностью и энергией ионов. Такая конфигурация, включающая индуктивно-связанный источник плазмы для контроля плотности плазмы, в настоящее время широко используется в МЭМС индустрии. Управление энергией ионов осуществляется заданием, так называемого напряжения смещения на держателе пластин при установлении соответствующей ВЧ-мощности смещения. Конструкционные особенности реактора подробно описаны в предыдущей работе [23].

Выбор параметров стадий опирался на базовый двухстадийный процесс травления канавок с невысоким значением $AR \sim 6$ [24]. Процесс травления проводился по специальному рисунку маски, который позволяет использовать настроенный под определенную ширину канавки процесс TMDSE для травления конструктивных полостей микроструктур с разной топологией и размерами. Специальный рисунок маски представляет собой замкнутые “разрезные” линии одинаковой ширины w_{cut} расположенные по периметру полостей разной ширины $w > 2 \cdot w_{cut}$. Такой подход успешно реализуется в технологиях, использующих сквозное травление, из-за тривиальной возможности отделения балластных островков кремния от пластины после завершения процесса [24, 25]. Поскольку конструкция изготавливаемого чувствительного элемента микро-гироскопа имеет размеры полостей 30 мкм и более, для обеспечения идентичного профиля элементов чувствительного элемента использовался рисунок маски с $w_{cut} = 30$ мкм.

Особенностью базового процесса TMDSE является использование смеси $C_4F_8 + SF_6$ в качестве газовой среды на стадии “осаждение”. Известно, что интенсивность полимеризации зависит от со-

отношения концентраций активных радикалов фтора (n_F) и концентрации радикалов способных к полимеризации (n_{poly}). В плазме фторуглеродных газов C_xF_y при $y/x < 2$, значения n_F/n_{poly} существенно меньше единицы, что обуславливает высокую способность полимеризации [26, 27]. В чистой C_4F_8 плазме при низкой энергии ионов (потенциал плазмы $U_p \sim 20$ В) вклад ионной составляющей является преобладающим в кинетике полимеризации. В результате полимер будет осаждаться быстрее на дне (вследствие более интенсивной обработки ионами), чем на стенках канавок. Для стадии “осаждение” в процедуре TMDSE более предпочтителен изотропный характер полимеризации, который может быть реализован при добавлении к C_4F_8 газов, характеризующихся высоким отношением с n_F/n_{poly} [28, 29].

Эксперимент был разделен на две основные части. В первой части проводились измерения длительности удаления полимера (t_r) и скорости процессов: осаждения полимера, удаления полимера и травления SiO_2 . Измерения основаны на регистрации динамики процессов осаждения и травления на поверхности окисленного кремния методом лазерной интерферометрии непосредственно в процессе TMDSE [23]. Изучено влияние параметров стадии “осаждение” на величину t_r и длительности стадии “удаление” на среднюю скорость эрозии SiO_2 . Параметры процесса: расходы газов (Q_{SF_6} , $Q_{C_4F_8}$), давление в реакторе (P), ВЧ-мощность смещения (W_{bias}), напряжение смещения ($-U_{bias}$), длительности стадий — t_d (“осаждение”); t_{bias} (“удаление”); t_e (“травление”), представлены в табл. 1. Относительное содержание SF_6 в смеси с C_4F_8 — $R = Q_{SF_6}/Q_{C_4F_8}$ варьировалось в двух диапазонах: 0.13–0.2 и 0.23–0.3, при длительности стадии “осаждение” (t_d) — 3 с и 5 с соответственно. Мощность индуктивного источника плазмы составляла 780 Вт во всех экспериментах.

Таблица 1. Параметры TMSDE

Стадии	t , с	Q_{SF_6} , нсм ³ /мин	P^{**} , Па	$Q_{C_4F_8}$, нсм ³ /мин	W_{bias} , Вт	$-U_{bias}$, В
Осаждение	3	8; 10; 12	1.1; 1.2; 1.3	60	0	6
	5	14; 16; 18	1.4; 1.5; 1.6			
Удаление	var^*	150	3.7	3	20	65
Травление	var^*	150	3.7	3	0	6

* переменная величина, устанавливаемая с сохранением суммы $t_{bias} + t_e = 9$ с.

** давление определяется суммарным расходом газа без регулировки скорости откачки.

Во второй части проводилось изучение формы профиля и качество стенок канавок ($w = 30$ мкм) в зависимости от параметров и количества циклов (N) TMDSE и глубины травления (значения AR). Эксперименты проводились на небольших кремниевых пластинках 2×2 см, с применением маски фоторезиста AZ6542 толщиной 6.5 мкм. В заключение приведены результаты изготовления функциональных элементов чувствительных элементов микро-гироскопа на пластинах с двухсторонней полировкой, диаметром 76 мм. Для изготовления использовалась двухслойная маска — SiO_2 (1 мкм)/фоторезист S1813 SP15 (1.25 мкм). Форма профилей и качество поверхности стенок канавок исследовались с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ Zeiss Supra-40). Результаты измерений геометрических параметров канавок представлены в табл. 2

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика изменения параметров TMDSE и скоростей процессов осаждения и травления, измеренных методом лазерной интерферометрии, представлены на рис. 2. Измерения были синхронизированы с заданной временной диаграммой

переключения параметров процесса в программе управления циклом. Значения расхода газов задавались регуляторами расхода газов (РРГ MKS Instruments 1179B, полная шкала по эталонному газу N_2 равна $1000 \text{ нсм}^3/\text{мин}$) с ПИД параметрами, обеспечивающими быстрое установление заданного значения при переключении (< 0.8 с). Однако, когда коэффициент преобразования (k_c) между эталонным и фактическим газом значительно отличается от 1, динамические характеристики РРГ ухудшаются из-за несоответствия эталонным ПИД параметрам [30]. В нашем случае значения $k_c = 0.26$ и 0.17 для газов SF_6 и C_4F_8 , соответственно, много меньше 1, что обуславливает слишком быстрый отклик РРГ, приводящий к колебательному режиму переключения. Поэтому плавный режим переключения обеспечивался ступенчатым заданием промежуточных значений расхода с интервалом 0.2 с (рис. 2а).

По результатам измерения скорости осаждения и травления в цикле TMDSE четко прослеживаются разные уровни интенсивности процессов на каждой стадии (рис. 2б). Определение скоростей осаждения и травления полимера не корректно во время переходных процессов [23], поэтому соответствующие данные на графике

Таблица 2. Результаты измерений геометрических параметров канавок, полученных в разных процессах TMDSE: h — глубина канавки, w_{top} — ширина в верхней части канавки, w_{bot} — ширина в основании канавки, θ (радиан) = $\arctg[(w_{\text{bot}} - w_{\text{top}})/2h]$ — средний угол наклона стенок канавки

Q_{SF_6} , нсм ³ /мин	R	h_d , нм	t_{bias} , с	Δ , с	N , шт	h , мкм	w_{top} , мкм	w_{bot} , мкм	$-\theta$, град
8	0.13	8.6	3	0.4	350	297	34.3	39.9	0.54
10	0.17	6.4	3	0.8	350	292	35.6	42.8	0.71
					400	338	35.7	42.6	0.58
			4	1.8	400	341	36.3	47.7	0.96
12	0.2	5.4	3	1.3	350	296	36.1	45.5	0.91
					120	114	31.5	36.7	1.31
14	0.23	7.2	3	0.6	400	327	35.3	37	0.15
16	0.27	5.6	3	1.1		330	35.4	41.7	0.55
18	0.3	4.8	3	1.6		340	35.2	44.5	0.78
10	0.17		3	0.8	1–200	328	36.3	47.4	0.97
			3.5	1.3	201–300				
			4	1.8	301–400				
14	0.23		3	0.6	1–350	349	33.7	38.1	0.36
			3.5	1.1	351–450				

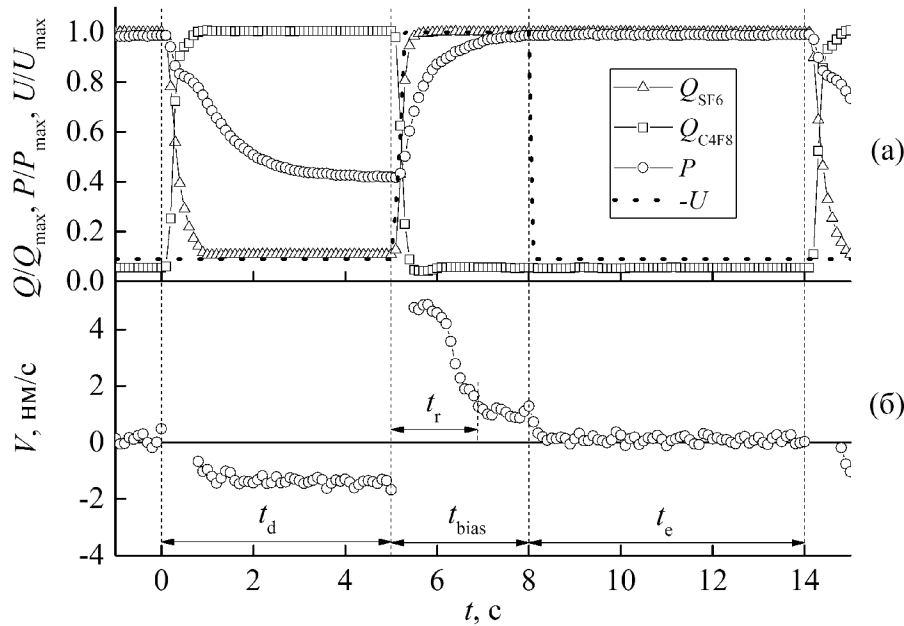


Рис. 2. (а) — Нормированные значения Q , P , U в течение одного цикла TMDSE, (б) — скорости процессов V : осаждения ($-V$) и травления ($+V$) на разных стадиях TMDSE ($R = 0.27$, $t_f = 1.9$ с).

не представлены. Так, процесс удаления полимера однозначно идентифицируется по наблюдаемому изменению скорости травления в условиях стадии “удаление”, так как скорость травления полимера много больше, чем скорость травления SiO_2 . Стационарные значения скорости осаждения и травления полимера фиксируются практически одновременно с установкой заданных значений Q (задержка ~ 0.3 с). Это несколько неожиданный результат, поскольку время установки давления в реакторе составляет ~ 3 с, что много больше, чем длительность переходных процессов переключения потоков газов (0.8 с и 0.4 с). Можно предположить, что соотношение n_F/n_{poly} в плазме, контролирующее скорость осаждения полимера, стабилизируется быстрее, чем давление. Изменение давления в большей степени влияет на скорость травления в режиме РИТ на стадии “удаление”. При увеличении давления в нашем реакторе уменьшается плотность ионного потока и соответственно уменьшается скорость травления полимера. В связи с этим, одной из причин затянутой динамики перехода от травления полимера к травлению SiO_2 (уменьшение скорости травления полимера в течение ~ 1 с) является изменение давления.

Результаты измерения длительности удаления полимера (t_r), скорости процессов: осаждения полимера (V_d), удаления полимера (V_r), травления SiO_2 со смещением (V_{bias}) и травления SiO_2 без смещения (V_0), при разных параметрах стадий TMDSE

представлены в таблице 2. Значения скорости осаждения полимера и ее зависимость от процентного соотношения $R = Q_{\text{SF6}}/Q_{\text{C4F8}}$ находятся в хорошем согласии с результатами, полученными в непрерывном процессе осаждения в реакторе подобной конфигурации [31]. В цитируемой работе было обнаружено что, условный переход от ионно-стимулированного режима осаждения к изотропному режиму происходит при значениях R больше 10 %. Погрешность измерения скорости осаждения полимера интерферометрическим методом связана с неизвестной величиной показателя преломления полимера. Представленные значения V_d получены, исходя из предположения, что показатель преломления полимера незначительно отличается от SiO_2 (1.46). В целом измеренная длительность удаления полимера находится в однозначной корреляции с его толщиной (табл. 3).

Согласно представленным в табл. 3 результатам измерения, скорость травления SiO_2 на стадии (“травление”), проводимой в режиме ПХТ (V_0) отличается от скорости травления SiO_2 на стадии “удаление” в режиме РИТ (V_{bias}) более чем в шесть раз. Средняя (за цикл) скорость травления SiO_2 (V_{SiO_2}) определяется следующим выражением:

$$V_{\text{SiO}_2} = \frac{V_{\text{bias}}(t_{\text{bias}} - t_r) + V_0 t_e}{t_c}, \quad (1)$$

где t_c — полное время цикла.

Таблица 3. Результаты измерений

$R = Q_{\text{SF}_6}/Q_{\text{C}_4\text{F}_8}$	t_d , с	V_d , нм/с	h_d^* , нм	t_r , с	V_r , нм/с	V_{bias} , нм/с	V_0 , нм/с
$8/60 = 0.13$	3	4.3	8.6	2.6	4.7	1.0	0.15
$10/60 = 0.17$		3.2	6.4	2.2			
$12/60 = 0.20$		2.7	5.4	1.7			
$14/60 = 0.23$	5	1.8	7.2	2.4			
$16/60 = 0.27$		1.4	5.6	1.9			
$18/60 = 0.30$		1.2	4.8	1.4			

* h_d — значения толщины полимера, вычисленные по значениям V_d и времени активного осаждения равного $(t_d - 1)$ с.

В соответствии с выражением (1) скорость V_{SiO_2} в значительной степени зависит от разности $\Delta = (t_{\text{bias}} - t_r)$, вследствие ионно-стимулированного механизма травления SiO_2 , тогда как травление кремния в SF_6 плазме контролируется потоком радикалов F [32]. Так, выражение для средней (за цикл) скорости травления кремния может быть представлено в виде:

$$V_{\text{Si}} = \frac{V_{\text{iso}}(t_{\text{bias}} - t_r + t_c)}{t_c}, \quad (2)$$

где V_{iso} — скорость изотропного травления кремния в SF_6 плазме.

Изменение разности Δ не влияет на значение V_{Si} при условии $t_{\text{bias}} + t_c = \text{const}$. Следовательно, подстройка времени стадии "удаление" t_{bias} к измеренному значению t_r в предложенной концепции оптимизации ($t_{\text{bias}} + t_c = \text{const}$) будет обуславливать увеличение селективности TMDSE (S) по отношению к SiO_2 маске. При значении $\Delta = 0$ с, селективность $S = V_{\text{Si}}/V_{\text{SiO}_2} = V_{\text{iso}}/V_0$ определяется соотношением скорости процессов, которые контролируются разными механизмами травления, что обеспечивает максимальную селективность процесса. Результаты измерения скорости V_{SiO_2} и селективности S при разных значениях t_{bias} в процессе TMDSE ($R = 0.17$, $t_r = 2.2$ с) представлены на рис. 3. Наблюдается удовлетворительное согласие значений V_{SiO_2} , полученных по результатам измерений скоростей процессов, в цикле с использованием выражения (1) и результатов измерения скорости травления SiO_2 в среднем за несколько десятков циклов.

Теоретически, настройка времени стадии "удаление" для выполнения условия $\Delta \sim 0$ с может обеспечить очень высокую селективность процесса. На практике, своевременность смены стадии "удаление" на стадию "травление" определяется

в том числе технологическими отклонениями величины t_r , которые могут обуславливать недостаточно полное удаление полимера на стадии "удаление". Поэтому задача настройки времени стадии "удаление" сводится к поиску оптимальной разности $\Delta > 0$ с по результатам исследования качества профиля канавок и оценке воспроизводимости результатов. Предварительное исследование, проведенное в работе, выявило плохую повторяемость результата травления в режиме TMDSE при $\Delta = 0.4$ с [23]. В отдельных экспериментах происходило сравнительно плохое травление с сильно выраженными дефектами поверхности дна и стенок канавок, что вероятно связано, с технологическими отклонениями ве-

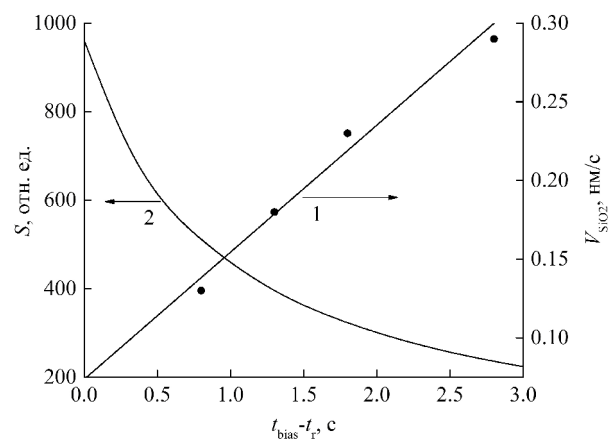


Рис. 3. Зависимости: средней скорости травления SiO_2 (1) и селективности процесса TMDSE (2) от параметра $\Delta = t_{\text{bias}} - t_r$. Круги — значения V_{SiO_2} , вычисленные по изменению толщины слоя SiO_2 за несколько десятков циклов, линия — зависимость V_{SiO_2} от Δ , вычисленная по формуле (1). Значения селективности рассчитаны для $V_{\text{Si}} = 70.4$ нм/с, при глубине травления 338 мкм за 400 циклов (табл. 2).

личины t_r . При низком номинальном значении Δ , фактически может реализовываться условие $\Delta \sim 0$ с и завершение процесса удаления полимера происходит в режиме ПХТ. Процесс травления кремния в режиме ПХТ обладает более высокой селективностью к полимеру по сравнению с РИТ. Полимер, благодаря сетчатой структуре, представляет собой набор полимерных микромасок [33], что обуславливает формирование кремниевых микроигл на поверхности дна канавок и торможение процесса травления. Процессы TMDSE при $\Delta > 0.4$ с показывают более высокую надежность при повторном тестировании. Измеренное значение t_r и соответствующее значение Δ характеризуют TMDSE на начальном этапе процесса при невысоком аспектном отношении канавок $AR \sim 0$. Характер зависимости скоростей процессов осаждения и травления полимера на дне канавки от ее глубины предопределяет уменьшение значения t_r при увеличении аспектного отношения [34, 35]. Следовательно, начальное условие $\Delta > 0$ с будет сохраняться с увеличением аспектного отношения в процессе травления.

Результаты тестирования режимов TMDSE с $t_d = 3$ с, $t_{bias} = 3$ с и параметром R в диапазоне 0.13–0.2 представлены на рисунке 4. Все рецепты TMDSE характеризуются осаждением тонкого полимера (менее 10 нм), что обеспечивает почти полное обновление защитного слоя на стенках в каждом цикле и вместе с тем высокую анизотропию травления. В верхней части канавок (под маской) наблюдается специфичная для циклической процедуры TMDSE текстура поверхности стенки в виде гребешков. Подтрав под маску (δ) незначительно варьируется в представленных процессах

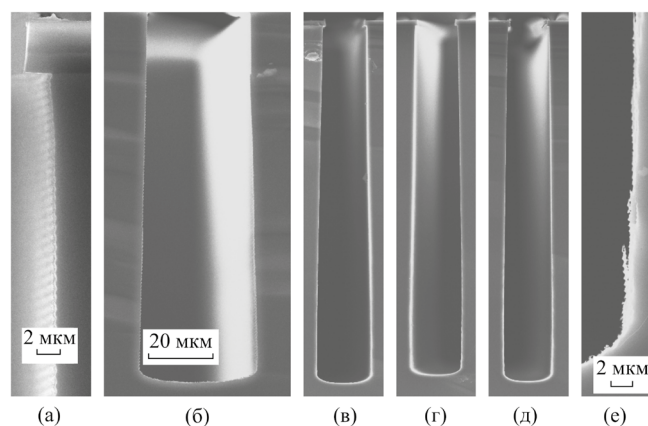


Рис. 4. Специфичная для циклической процедуры TMDSE текстура поверхности стенки в виде гребешков под маской (а), профили травления канавок при разных параметрах R - Δ : 0.2–1.3 с, $h = 114$ мкм (б), 0.2–1.3 с, $h = 296$ мкм (в), 0.17–0.8 с, (г), 0.13–0.4 с (д, е).

травления и составляет ~ 2.5 мкм (рис. 4а). Профиль травления в тестируемых режимах TMDSE характеризуется отрицательным углом наклона стенок в среднем ($-\theta$), т.е. основание канавки более широкое, чем ее верх (под маской). Процессы РИТ характеризуются неустраняемым угловым расхождением потока ионов из плазмы. Наличие бомбардировки ионами под углами отличными от нормального на стадии “удаление” определяет тенденцию к уширению дна канавок в процессе травления. Уширение дна происходит практически линейно по глубине канавок ($\theta = 1.31^\circ$) при небольших значениях $AR < 4$ (рис. 4б). Текстура поверхности стенки в виде гребешков сохраняется по всей глубине канавок. С увеличением глубины травления до ~ 300 мкм реализуется уже бочкообразная форма профиля (рис. 4в). При этом средний угол наклона стенок θ уменьшается с 1.31° до 0.91° при $R = 0.2$ за счет искажения формы профиля. По той же причине наблюдается тенденция к уменьшению среднего угла наклона стенок с уменьшением R (рис. 4в, г, д). Хорошо известна закономерность, связанная с влиянием толщины полимера на профиль травления, — чем больше толщина полимера, тем меньше величина угла наклона стенок [36]. Однако изменение локального наклона стенок в нижней части канавок при больших значениях h_d сопровождается возникновением грубой текстуры поверхности стенок (рис. 4е). В тестируемых процессах TMDSE ($t_{bias} = \text{const}$) с разными значениями R увеличение толщины полимера (h_d) сопровождается увеличением длительности его удаления (t_r), т.е. уменьшением значения Δ . Целью следующих экспериментов было тестирование процессов TMDSE с разными значениями $\Delta(t_{bias})$ при одинаковых условиях стадии “осаждение” ($h_d = \text{const}$). Влияние фактора Δ на профиль травления и качество поверхности стенок канавок изучались в процессах с увеличением количества циклов с 350 до 400 для достижения целевого значения глубины травления $h \sim 350$ мкм.

Результаты травления в процессах TMDSE с разным временем стадии “удаление” t_{bias} при одинаковой величине $R = 0.17$ ($t_r = 2.2$ с) представлены на рис. 5. Наиболее выраженное отличие профиля при заданных значениях: $t_{bias} = 4$ с ($\Delta = 1.8$ с) и 3 с ($\Delta = 0.8$ с) наблюдается в нижней части канавок (рис. 5а, б). В процессе травления со сравнительно низким значением $\Delta = 0.8$ с локальный угол наклона стенок канавок на глубине более 290 мкм становится положительным, т.е. критическое значение аспектного отношения AR_c достигается до момента окончания травления ($h = 338$ мкм). При более высоком значении $\Delta = 1.8$ с локальные

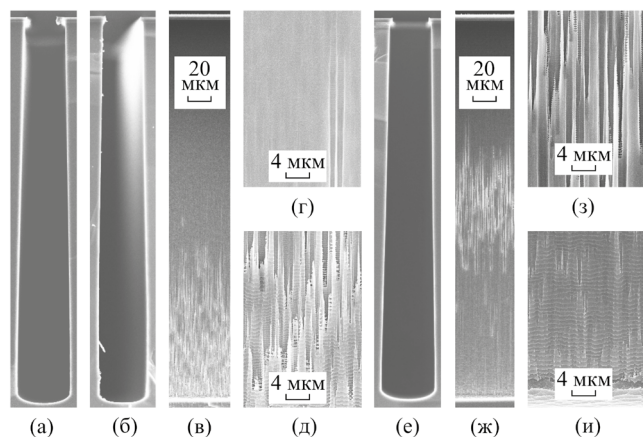


Рис. 5. Профили травления канавок при $R = 0.17$: (а) — $\Delta = 1.8$ с, (б) — $\Delta = 0.8$ с. Вид на стенку канавки ($\Delta = 0.8$ с) по всей ее глубине (в), в середине (г), в нижней части (д). Результаты, полученные в процессе TMDSE с сегментированным изменением Δ с 0.8 с до 1.8 с (е — и).

углы наклона стенок остаются отрицательными по всей глубине канавок. Различная форма профиля в данных экспериментах обуславливает разные значения среднего угла наклона стенок — 0.96° ($\Delta = 1.8$ с) и 0.58° ($\Delta = 0.8$ с). Таким образом, разность Δ является фактором, контролирующим форму профиля. В процессах TMDSE с низким значением $\Delta = 0.8$ с наблюдается ухудшение качества поверхности стенок, которое взаимосвязано с искажением формы профиля в нижней части канавок (рис. 5б, в). Текстура поверхности в виде гребешков становится менее выраженной в средней части, где вместе с изменением локального наклона, на стенке образуются одиночные бороздки шириной ~ 1 мкм (рис. 5г). Грубая текстура поверхности стенок начинает проявляться в нижней части канавок, где происходит существенное изменение локального наклона стенок (рис. 5д).

Искажение формы профиля в процессах травления с низким значением Δ может быть объяснено недостаточно полной очисткой поверхности в течение стадии “удаление”. Плотность ионного потока на центральную область поверхности дна выше, чем на область вблизи стенки высоко-аспектной канавки, вследствие углового расхождения потока ионов. В результате происходит задержка очистки поверхности дна вблизи стенки (в углу канавки). Изложенные представления были проверены в эксперименте с последовательным изменением параметра Δ в процессе травления. Использовался рецепт TMDSE с сегментированным увеличением t_{bias} , т.е. каждое следующее значение t_{bias} задавалось на определенное количество циклов (N). Стартовый сег-

мент циклов выполнялся при значении $t_{\text{bias}} = 3$ с соответствующего процесса TMDSE ($N = 400$) с фиксированным параметром $\Delta = 0.8$ с (рис. 5б). Результат травления за 400 сегментированных циклов: первые 200 циклов — $t_{\text{bias}} = 3$ с ($\Delta = 0.8$ с), вторые 100 циклов — $t_{\text{bias}} = 3.5$ с ($\Delta = 1.3$ с), заключительные 100 циклов — $t_{\text{bias}} = 4$ с ($\Delta = 1.8$ с), представлен на рис. 5е–и. В таком процессе достигается прямолинейный профиль стенок с углом наклона $\theta = 0.97$, совпадающим с углом наклона в верхней части канавки при травлении в соответствующем процессе с фиксированным значением t_{bias} (рис. 5е). В средней части канавок на поверхности стенки наблюдаются множественные бороздки шириной ~ 1 –2 мкм (рис. 5ж, з). При этом эффект образования грубой текстуры на поверхности стенок вблизи дна канавки подавляется (рис. 5и).

Последовательное увеличение $\Delta(t_{\text{bias}})$ обеспечивает полную очистку поверхности дна, в результате чего достигается коррекция формы профиля, и улучшение качества поверхности стенки в нижней части высоко-аспектных канавок. Вместе с тем, увеличивается длительность ионной обработки поверхности стенок, что обуславливает повреждение защитного слоя полимера. Узкие бороздки на стенках в средней части канавок свидетельствуют о локальном характере повреждений, что может быть связано с возникновением пустот внутри полимера в процессе осаждения [37]. На стадии “удаление” в местах нахождения пустот возможно образование дырок в полимере вследствие бомбардировки расходящимся потоком ионов. Ионы, падающие под углами отличными от нормали, провоцируют вторичный процесс травления узких каналов через дырки в полимере на поверхности стенок. Соответствующие дефекты поверхности стенок в виде бороздок начинают проявляться на глубине канавок — $L \sim 100$ мкм (рис. 5ж, з), тогда как на поверхности стенок под маской сохраняется специфическая для циклической процедуры травления не поврежденная текстура (рис. 5и). Углы падения ионов на поверхность стенки в верхней части канавок ограничены вследствие затенения потока выступающим краем маски шириной $\delta = 2.5$ мкм (рис. 4б). Следовательно, критические значения угла падения ионов (φ_{max}), при которых происходит эффективное повреждение полимера на стенках, могут быть определены исходя из простых геометрических представлений: $\varphi_{\text{max}} (\text{радиан}) = \arctg(\delta/L)$.

Согласно приведенной оценке, получение качественного профиля травления с углом наклона $\theta < \varphi_{\text{max}} = 1.43^\circ$ затруднено по причине высокой вероятности возникновения дефектов на стенках.

Одним из решений этой проблемы может быть усиление защиты стенок более толстым слоем полимера. Для этого было бы оптимальным найти режим, при котором скорость осаждения на дне канавки меньше, чем на боковых стенках из-за гораздо большего потока ионов. Такая анизотропия осаждения, в частности, возможна за счет потока радикалов на поверхность стенок в результате переосаждения с поверхности дна. Известно, что процесс переосаждения на стенку усиливается с увеличением соотношения радикалов n_F/n_{poly} в плазме [38, 39]. При достаточно больших значениях отношения n_F/n_{poly} , интенсификация ионно-стимулированных реакций атомов F с адсорбированными тяжелыми радикалами C_xF_y ($x > 2, y > 2x$) обуславливает торможение процесса полимеризации на дне канавок с увеличением потока десорбированных частиц на стенки.

На рис. 6 представлены результаты травления в процессах TMDSE с увеличенным соотношением R в диапазоне 0.23–0.3 ($t_d = 5$ с, $t_{bias} = 3$ с). В экспериментах с вариацией значения R в двух диапазонах: 0.13–0.2 и 0.23–0.3, задавалось разное время стадии «осаждение», с целью получения близких диапазонов значения $\Delta(t_r)$. Это дает возможность исключить фактор Δ при анализе профилей травления, полученных при разных соотношениях R . Канавки, полученные при высоких значениях $R = 0.3, 0.27, 0.23$ (рис. 6а–в) имеют углы наклона стенок меньше, чем в процессах с $R = 0.2, 0.17, 0.13$, соответственно (рис. 4в–д). Изменение среднего угла наклона стенок в зависимости от значения R в процессах TMDSE с одинаковым значением Δ объясняется усилением эффекта задержки удаления полимера в углу ка-

навок. Увеличение задержки является косвенным признаком усиления фактора переосаждения.

Результаты исследования были применены в технологии изготовления чувствительных элементов микро-гироскопа в пластинах кремния диаметром 76 мм, 380 ± 5 мкм. Сквозные полости между элементами чувствительных элементов формировались в двух последовательных процессах травления: первый – TMDSE с лицевой стороны пластины для формирования «разрезных» канавок, второй – травление в чистой SF_6 плазме с тыльной стороны для утонения пластины кремния. Глубина травления с лицевой стороны (350 мкм) меньше, чем толщина кремниевой пластины на 20–30 мкм. Повреждение структуры элементов чувствительных элементов в изотропном процессе утонения было исключено путем защиты поверхностей тонким слоем SiO_2 (0.15 мкм).

Травление «разрезных» канавок проводилось в режиме TMDSE со следующими параметрами стадии «осаждение»: $t_d = 5$ с, $R = 0.23$. В процессе травления использовалось сегментированное увеличение t_{bias} : первые 350 циклов – $t_{bias} = 3$ с ($\Delta = 0.6$ с), вторые 100 циклов – $t_{bias} = 3.5$ с ($\Delta = 1.1$ с). Выбранный режим травления обеспечивает практически вертикальный профиль стенок «разрезных» канавок ($\theta = 0.36^\circ$) при средней скорости травления кремния 3.4 мкм/мин (55.4 нм/с). Средняя скорость травления SiO_2 в таком процессе при разных значениях t_{bias} составляла 0.13 нм/с ($S = 426$, $t_{bias} = 3$ с) и 0.17 нм/с ($S = 325$, $t_{bias} = 3.5$ с). Скорость травления фоторезиста ожидаемо больше скорости травления SiO_2 в 2.9 раза. На рисунке 7а представлено изображение поперечного скола в месте расположения балластного островка между двумя «разрезными» канавками. В двумерную топологию маски были заложены балластные элементы с разными размерами и формой для формирования различных полостей между элементами конструкции чувствительных элементов. На рисунке 7б представлено изображение фрагмента чувствительных элементов с некоторыми конструктивными элементами чувствительных элементов после заключительного процесса утонения и удаления балластных элементов кремния. Состояние поверхности стенок не получается идеальным, но учитывая высокую вертикальность профиля негативное влияние расходящегося потока ионов не удалось подавить полностью (рис. 7в). Интенсивность ионного воздействия на стенки в процессе изготовления чувствительных элементов больше, чем в тестовых экспериментах, так как края двухслойной маски имеют большой ($\sim 45^\circ$) угол наклона. В процессе травления кремния



Рис. 6. Профили травления канавок при разных параметрах R – Δ : 0.3–1.6 с (а), 0.27–1.1 с (б), 0.23–0.6 с (в).

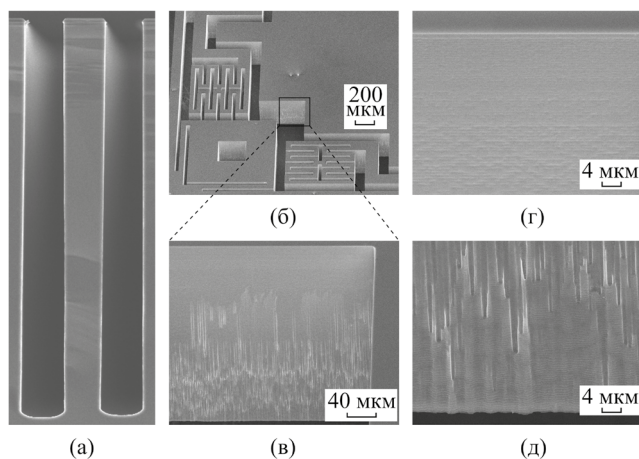


Рис. 7. Результаты изготовления чувствительного элемента микрогроскопа: (а) — профиль травления “разрезных” канавок — $h = 349$ мкм; (б) — вид фрагмента чувствительного элемента под углом 45° ; (в) — увеличенное изображение поверхности стенки конструкционного элемента чувствительный элемент всей его высоте; (г), (д) — текстура поверхности стенки в верхней и нижней части соответственно.

уход края маски в результате ее утонения составляет около 1.5 мкм, что обуславливает меньшую величину выступа δ . В результате происходит сглаживание гребешков на поверхности стенок в верхней части профиля и легкое повреждение стенок в нижней половине профиля (рис. 7г, д).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования динамики осаждения и удаления полимера непосредственно в процессе TMDSE с использованием лазерного интерферометра были применены для оптимизации трехстадийной процедуры травления. Выбор времени стадии “удаление” (t_{bias}) в соответствии с измеренным значением длительности удаления полимера (t_r) позволяет управлять как селективностью по отношению к маске, так и формой профиля травления. Установлено, что коррекция профиля канавок достигается при увеличении разности $\Delta(t_{\text{bias}})$ непосредственно в процессе травления. Минимизация параметра Δ в стартовых циклах TMDSE обеспечивает при этом получение максимальной селективности травления кремния по отношению к SiO_2 и фоторезистивной маске. Выбор газовой смеси $\text{SF}_6 + \text{C}_4\text{F}_8$ на стадии “осаждение” показывает свою перспективность для усиления защиты стенок при сохранении условий удаления полимера на дне канавок. Хотя увеличение содержания SF_6 в смеси усиливает полезный процесс переосаждения, сопутствующее снижение скорости осаждения требует увеличения времени стадии “оса-

ждение”. Это обуславливает уменьшение средней скорости TMDSE за счет уменьшения относительной длительности травления кремния в цикле в соответствии с выражением (2). Повышенные требования к защите стенок связаны по большей мере с неустрашимым угловым распределением ионного потока из плазмы. Настройка параметров стадии “удаление” с целью достижения более узкого распределения ионов по углу являются целью дальнейших исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФТИАН им. К.А. Валиева РАН Министерства науки и высшего образования РФ № FFNN-2022-0017 с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Диагностика микро- и наноструктур».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wu B., Kumar A., Pamarthy S. // J. Appl. Phys. 2010 V. 108. Art. No. 051101. <https://doi.org/10.1063/1.3474652>
2. Huff M. // Micromachines. 2021. V. 12. No. 8. P. 991. <https://doi.org/10.3390/mi12080991>
3. Tang Y., Najafi K. // 2016. IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems. <https://doi.org/10.1109/ISISS.2016.7435562>
4. Tang Y., Najafi K. // J. Microelectromech. Syst. 2018. V. 28. No. 1, P. 131–142. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2018.2884524>
5. Jia J., Ding X., Qin Z., et.al. // Measurement. 2021. V. 182. 109704. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109704>
6. Challoner A.D., Ge H.H., Liu J.Y. // 2014. IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. <https://doi.org/10.1109/PLANS.2014.6851410>
7. Schwartz D.M., Kim D., Stupar P., et.al. // J. Microelectromech. Syst. 2015. V.24. No. 3. P. 545–555. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2015.2393858>
8. Li Q., Xiao D., Zhou X. et al. // Microsyst. Nanoeng. 2018. V. 4. Art. No. 32. <https://doi.org/10.1038/s41378-018-0035-0>
9. Trusov A.A., Schofield A.R., Shkel A.M. // Sens. Actuator. A. Phys. 2011. V. 165. P. 26–34. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2010.01.007>
10. Askari S., Asadian M.H., Shkel A.M. // Micromachines, 2021. V. 12. No. 3. P. 266. <https://doi.org/10.3390/mi12030266>

11. Weinberg M.S., Kourepenis A. // J. Microelectromech. Syst. 2006. V. 15, No. 3, P. 479–491.
<https://doi.org/10.1109/JMEMS.2006.876779>
12. Li J., Liu A.Q., Zhang Q.X. // Sensors and Actuators A. 2006. V. 125. P. 494–503.
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.08.002>
13. Chen K.-S., Ayon A.A., Zhang X., Spearing S.M. // J. Microelectromech. Syst. 2002. V. 11. No. 3. P. 264–275.
<https://doi.org/10.1109/JMEMS.2002.1007405>
14. Yeom J., Wu Y., Selby J.C., Shannon M.A. // J. Vac. Sci. Technol. B. 2005 V. 23. Art. No. 2319.
<https://doi.org/10.1116/1.2101678>
15. Meng L., Yan J. // Micromech. Microeng. 2015. V. 25. Art. No. 035024.
<https://doi.org/10.1088/0960-1317/25/3/035024>
16. Xu T., Tao Z., Li H., et.al. // Advances in Mechanical Engineering. 2017. V. 9. No. 12. P. 1–19.
<https://doi.org/10.1177/1687814017738152>
17. Tang Y., Sandoughsaz A., Owen K.J., Najafi K. // J. Microelectromech. Syst. 2018. V. 27. No. 4. P. 686.
<https://doi.org/10.1109/JMEMS.2018.2843722>
18. Chang B., Leussink P., Jensen F. et al. // Microelectron. Eng. 2018. V. 191, P. 77.
<https://doi.org/10.1016/j.mee.2018.01.034>
19. Lips B., Puers R. // J. Phys.: Conf. Ser., 2016. V. 757. Art. No. 012005.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/757/1/012005>
20. Gerlt M.S., Läubli N.F., Manser M. et al. // Micromachines. 2021. V. 12. No. 5. P. 542.
<https://doi.org/10.3390/mi12050542>
21. Kim T., Lee J. Optimization of deep reactive ion etching for microscale silicon hole arrays with high aspect ratio // Micro and Nano Syst. Lett. 2022. V. 10. No. 12. P. 1–7.
<https://doi.org/10.1186/s40486-022-00155-6>
22. Abdolvand R., Ayazi F. // Sens. Actuator. A. Phys. 2008 V. 144. No. 1. P. 109–116.
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.12.026>
23. Морозов О.В. // Известия РАН. Серия физическая. 2024. Т. 88. № 4.
Morozov O.V. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2024. V. 88, No. 4, P. 447–453.
<https://doi.org/10.1134/S1062873823706050>
24. Morozov O., Postnikov A., Kozin I., et.al. // Proc. SPIE 8700, 2012 International Conference Micro- and Nano-Electronics 2012, 87000T (2013).
<https://doi.org/10.1117/12.2016784>
25. Chutani R.K., Hasegawa M., Maurice V., et.al. // Sens. Actuator. A. Phys. 2014. V. 208. P. 66–72.
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.12.031>
26. Ефремов А.М., Мурин Д.Б., Кwon К.-Н. // Микроэлектроника. 2020. Т. 49. № 3. С. 170–178.
<https://doi.org/10.31857/S0544126920020039>
Efremov A.M., Murin D.B., Kwon K.-H. // Russian Microelectronics, 2020, V. 49, No. 3, P. 157–165.
<https://doi.org/10.1134/S1063739720020031>
27. Мяконьких А.В., Кузьменко В.О., Ефремов А.М., Руденко К.В. // Микроэлектроника, 2022, Т. 51, № 6, С. 505–512.
<https://doi.org/10.31857/S0544126922700090>
Miakonkikh A.V., Kuzmenko V.O., Efremov A.M., Rudenko K.V. // Russian Microelectronics, 2022, V. 51, No. 6, P. 505–511.
<https://doi.org/10.1134/S1063739722700032>
28. Saraf I.R., Goeckner M.J., Goodlin B.E., et.al. // J. Vac. Sci. Technol. B. 2013. V. 31. Art. No. 011208.
<https://doi.org/10.1116/1.4769873>
29. Sant S.P., Nelson C.T., Overzet L.J., Goeckner M.J. // J. Vac. Sci. Technol. A. 2009. V. 27. No. 4. P. 631–642.
<https://doi.org/10.1116/1.3136850>
30. Lotters J. Model-Based Multi-Gas/Multi-Range Mass Flow Controllers With Single Gas Calibration and Tuning // Gases and Instrumentation. 2008.
http://tuncell.com/userfiles/modelbased_multigasmultirange_mfcs.pdf
31. Амиров И.И., Алов Н.В. // Химия высоких энергий. 2006. Т. 40. № 4. С. 311.
Amirov I.I., Alov N.V. // High Energy Chemistry. 2006. V. 40. No. 4. P. 267–272.
<https://doi.org/10.1134/S0018143906040114>
32. Руденко К.В., Мяконьких А.В., Орликовский А.А. // Микроэлектроника. 2007. Т. 36. № 3. С. 206.
Rudenko K.V., Myakon'kikh A.V., Orlikovsky A.A. // Russian Microelectronics. 2007. V. 36. No. 3. P. 179–192.
<https://doi.org/10.1134/S1063739707030079>
33. Amirov I.I., Gorlachev E.S., Mazaletskiy L.A., et.al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. V. 51. No. 11. P. 267.
<https://doi.org/10.1088/1361-6463/aaacbe>
34. Морозов О.В., Амиров И.И. // Микроэлектроника. 2007. Т. 36. № 5. С. 380.
Morozov O.V., Amirov I.I. // Russian Microelectronics, 2007, V. 36, No. 5, P. 333–341.
<https://doi.org/10.1134/S1063739707050071>
35. Lai L., Johnson D., Westerman R. // J. Vac. Sci. Technol. A. 2006. V. 24. P. 1283.
<https://doi.org/10.1116/1.2172944>
36. Craigie C.J.D., Sheehan T., Johnson V.N., et.al. // J. Vac. Sci. Technol. B. 2002. V. 20(6). P. 2229–2232.
<https://doi.org/10.1116/1.1515910>
37. Choi J.W., Loh W.L., Praveen S.K., et. al. // 2013. J. Micromech. Microeng. V. 23. Art. No. 065005.
<https://doi.org/10.1088/0960-1317/23/6/065005>
38. Min J.-H., Lee G.-R., Lee J.-K., Moon S.H. // 2004. J. Vac. Sci. Technol. B. V. 22. No. 6. P. 2580–2588.
<https://doi.org/10.1116/1.1808746>
39. Min J.-H., Lee G.-R., Lee J.-K., Moon S.H. // 2004. J. Vac. Sci. Technol. B. 2004. V. 22. No. 3. P. 893–901.
<https://doi.org/10.1116/1.1695338>

Control of Mask Erosion and Correction of Structure Profile in an Adapted Process of Deep Reactive Ion Etching of Silicon

© 2024 г. О. В. Morozov*

Valiev Institute of Physics and Technology RAS, Yaroslavl Branch, NRC “Kurchatov Institute” Yaroslavl, 150067 Russia

**e-mail: moleg1967@yandex.ru*

The paper presents a new approach to optimizing the cyclic procedure of deep reactive ion etching (DRIE) of silicon. The etching parameters were adjusted based on direct measurements of the rates of deposition and etching processes in a cycle on the surface of oxidized silicon using a laser interferometer. A high-quality etching profile with minimal erosion of the SiO_2 mask (maximum process selectivity) was achieved by adapting the three-stage DRIE process according to the measured duration of polymer removal at the bottom of the grooves in silicon. The possibilities of correcting the profile shape by changing the DRIE parameters during the etching process are presented. As a result of optimization, a recipe was obtained for etching grooves 30 μm wide to a depth of 350 μm with a wall angle of 0.36° , at a process rate and selectivity of 3.4 $\mu\text{m}/\text{min}$ and ~ 400 , respectively. The adapted recipe was successfully applied in the manufacturing technology of the sensitive element of a micromechanical gyroscope.

Keywords: deep reactive ion etching of silicon, cyclic procedure, etching profile, selectivity, laser interferometer.