

## Скорость травления кремния локализованным газовым разрядом

© А.В. Абрамов, Е.А. Панкратова, И.С. Суровцев

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет,  
394006 Воронеж, Россия  
e-mail: AbramovVGASU@Yandex.ru

(Поступило в Редакцию 19 декабря 2013 г.)

Представлены результаты исследований влияния на скорость травления кремния различных технологических, конструктивных и электрофизических параметров, характеризующих условия горения и свойства локализованного газового разряда. Эксперименты проводились при давлении газа  $10^4$ – $10^5$  Па и длине разрядного промежутка 50–500 мкм. Показана эффективность применения метода эмиссионной спектроскопии для контроля момента начала и завершения травления слоев различных материалов локализованным газовым разрядом.

### Введение

В работах [1,2] впервые было показано, что при определенном сочетании давления газа ( $P$ ) и длины разрядного промежутка ( $L$ ) можно добиться локализации разряда в точном соответствии с геометрией выступающих в направлении обрабатываемого материала элементов поверхности электрода. Такая особенность локализованного газового разряда (ЛГР) позволила применить его для размерного безмасочного травления поверхности материалов. Такое травление было названо „негативным“, поскольку под выступающими элементами электрода формируются углубления. В работе [3] были приведены результаты исследований влияния различных параметров ЛГР на разрешающую способность проводимого с его помощью безмасочного размерного травления кремния и диоксида кремния. В работе [4] представлена математическая модель этого процесса. В частности, получены пространственно-временные распределения заряженных и незаряженных компонентов ЛГР у прямоугольного элемента поверхности электрода. Проведен сравнительный анализ результатов моделирования и полученных экспериментально с помощью ЛГР-распределений скоростей травления Si и SiO<sub>2</sub>.

Настоящая работа посвящена, главным образом, обсуждению результатов экспериментальных исследований влияния различных параметров, определяющих условия горения ЛГР, на скорость травления ( $V_{et}$ ) кремния, материала, наиболее широко используемого в электронной промышленности. Показана возможность применения метода эмиссионной спектроскопии для контроля момента начала и окончания травления локализованным газовым разрядом (ТЛГР) слоев различных материалов.

### Оборудование и условия эксперимента

Для откачки воздуха из разрядной камеры (РК) объемом  $5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup> до давления не хуже 5 Па применялся насос НВР-5Д. Давление рабочих газов в ходе экспериментов устанавливалось в пределах  $10^4$ – $10^5$  Па. В этом

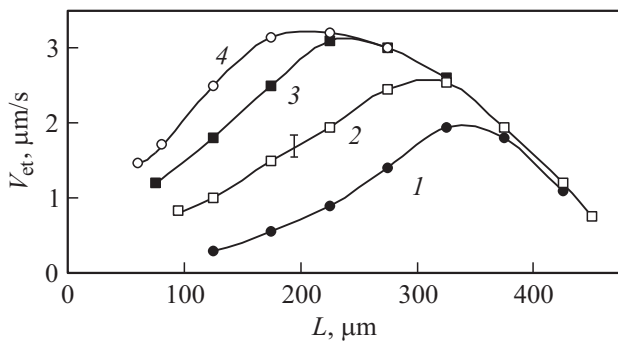
случае давление остаточных газов в РК должно быть менее 0.05%. Поскольку в условиях эксперимента объем РК был больше объема ЛГР в  $10^4$ – $10^5$  раз, то процесс травления проводился в замкнутом объеме, а смена газа в зоне горения разряда обеспечивалась исключительно за счет диффузии. Возбуждающее разряд напряжение с частотой 13.56 МГц подавалось от генератора УВ-1, конструкция которого позволяет контролировать поглощаемую разрядом мощность  $P_{rf}$ . Параметры топологии поверхности электрода, а также профилей канавок травления измеряли с помощью интерферометра МИИ-4. В работе использовался разряд тлеющего типа, который равномерно и устойчиво горел под выступающими элементами поверхности электрода при  $P \times L = 2$ – $10$  Па м. Эта область значений  $P \times L$  находится вблизи минимума на кривой Пашена и соответствует условиям существования нормального тлеющего разряда [5]. При указанных значениях  $P \times L$  соблюдалось также соотношение  $L \approx 10\lambda_e$ , где  $\lambda_e$  — длина свободного пробега электронов.

В качестве плазмообразующих газов использовались гексафторид серы (SF<sub>6</sub>) и тетрафторид углерода (CF<sub>4</sub>), а также их смеси с кислородом (O<sub>2</sub>), аргоном (Ar) и воздухом. Для контроля интенсивности линии, соответствующей длине волны 703.7 нм в спектре излучения атомов F в ЛГР, ( $I_F$ ) использовался вычислительный комплекс КСВУ-23М, изготовленный на базе монохроматора МДР-23 с фотоумножителем ФЭУ-100.

### Результаты исследований и их обсуждение

#### Параметры, определяющие скорость травления материалов посредством ЛГР

Представленные на рис. 1 графики иллюстрируют влияние длины разрядного промежутка на скорость ТЛГР кремния. На начальных участках представленных графиков с ростом  $L$  наблюдается увеличение  $V_{et}$ , которое можно объяснить уменьшением скважности между периодами горения ЛГР, который при указанных

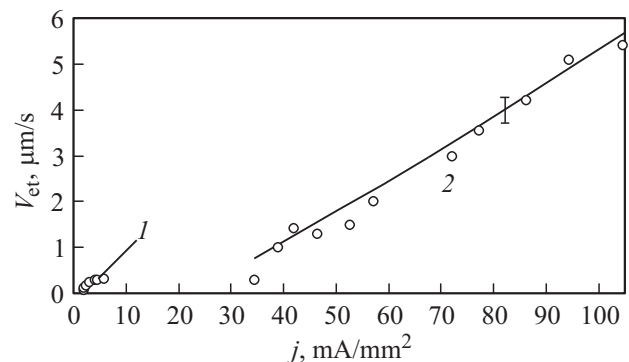


**Рис. 1.** Зависимость скорости ТЛГР кремния от межэлектродного расстояния. Газ  $\text{SF}_6$ ,  $l = 100 \mu\text{m}$ ,  $P_{rf} = 30 \text{ W}$ ,  $U_{rf} = 135 \text{ V}$ ,  $\text{SF}_6$ ,  $p = 10^4$  (1),  $1.5 \cdot 10^4$  (2),  $2 \cdot 10^4$  (3),  $2.5 \cdot 10^4 \text{ Pa}$  (4).

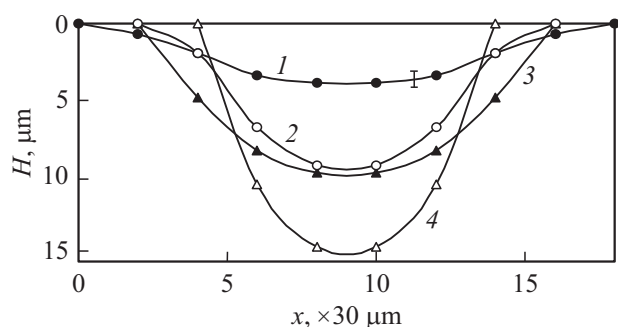
режимах горения ведет себя как разряд переменного тока [2,5], т.е. в каждом полупериоде колебаний ВЧ-напряжения катодный слой формируется лишь у одного из электродов и до его окончания распадается. Затем процесс повторяется у другого электрода. Причем для каждого давления существует минимальное значение  $L$ , при котором возможно образование электронной лавины и зажигание ЛГР. Эта особенность ЛГР объясняет смещение начала кривых на рис. 1 в сторону меньших  $L$  по мере роста  $P$ . Учитывая изложенное, наблюдаемое увеличение  $V_{\text{et}}$  с ростом  $L$  на начальных участках представленных графиков можно объяснить оптимизацией условий горения ЛГР. В результате этого, вероятно, увеличиваются толщина светящегося слоя и концентрация в нем заряженных и химически активных частиц (ХАЧ). Возможно, также увеличивается время горения разряда в каждом полупериоде. Однако при дальнейшем увеличении  $L$  вследствие уменьшения напряженности электрического поля существенно снижается энергия электронов. Это приводит к уменьшению вероятности ионизации и диссоциации молекул, а значит, и концентрации химически активных частиц (ХАЧ), которые осуществляют процесс травления. Конкурирующее влияние двух указанных факторов обуславливает наличие максимума на рассматриваемой зависимости. Причем, чем больше  $P$ , тем при меньших значениях  $L$  наблюдается максимум. Это связано с тем, что увеличение давления само приводит к снижению температуры электронов.

Другим важным параметром процесса горения ЛГР, влияющим на скорость травления материалов, является плотность разрядного тока ( $j$ ). В данном случае минимальное значение плотностей тока на представленных на рис. 2 графиках есть те их значения, которые устанавливаются при напряжении пробоя для конкретных значений  $pL$ . Максимальное значение  $j$  ограничивается перегревом плазмообразующего газа и переходом разряда в дуговую форму. Зависимость  $V_{\text{et}}$  от  $j$  исследована в двух интервалах значений плотности тока. В интервале меньших значений  $j$  рассматриваемая зависимость получена с применением круглого электрода площадью около  $30 \text{ mm}^2$ , а в интервале больших значений  $j$  —

с использованием прямоугольного электрода площадью  $\sim 2 \text{ mm}^2$ . В последнем случае ширина электрода составляла  $100 \mu\text{m}$ , но реальная ширина разряда достигала  $\sim 200 \mu\text{m}$ , а площадь поверхности его горения над обрабатываемым материалом составляла соответственно  $4 \text{ mm}^2$ . Это обстоятельство учитывалось при вычислении плотности тока. Из анализа представленных на рис. 2 графиков следует, что область значений плотности тока, в которых может существовать локализованный газовый разряд в тлеющей форме, зависит от соотношения  $L$  и линейных размеров области горения разряда. Пусть  $l$  — минимальный линейный размер электрода, под которым горит разряд. Тогда для круглого электрода значение  $l$  равно  $6 \text{ mm}$ , а для прямоугольного —  $100 \mu\text{m}$ . На рис. 2 видно, что под электродом с маленьким  $l$  загорание разряда происходит при большей плотности тока. Вероятно, это связано с тем, что при значениях  $l$ , соизмеримых с  $L$ , формирование плазмы затрудняется уходом заряженных частиц из объема пространства под электродом. В то же время при использовании узкого электрода возможно достижение большей плотности тока благодаря тому, что уход тепла из разряда происходит не только через электроды, но и за счет диффузии горячих частиц в газовую среду. Эксперименты показали, что при изменении  $j$  скорость травления под узким электродом меняется практически линейно, что иллюстрирует кривая 2 на рис. 2. При  $l \gg L$  последний процесс, как фактор отвода тепла из ЛГР, практически не играет роли. Поэтому при использовании электрода диаметром  $6 \text{ mm}$  переход разряда в дуговую форму наблюдается уже при  $j \sim 7 \text{ mA/mm}^2$ . В случае  $l \gg L$  зависимость  $V_{\text{et}}$  от  $j$  стремится к насыщению, что можно объяснить увеличением концентрации продуктов травления и уменьшением концентрации ХАЧ в зоне горения разряда. Эти два фактора приводят, как известно, к проявлению эффекта „загрузки“, т.е. уменьшению  $V_{\text{et}}$  с ростом общей площади травления ( $S$ ). В случае ТЛГР этот эффект носит локальный характер и  $V_{\text{et}}$  уменьшается с ростом отношения  $l/L$ . Величина  $S$  при этом заметной роли играть не будет, если травящиеся



**Рис. 2.** Зависимость скорости ТЛГР кремния от плотности тока в разряде. Газ  $\text{SF}_6$ ,  $p = 2 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ ,  $L = 100 \mu\text{m}$ ,  $U_{rf} = 210 \text{ V}$ . Электрод диаметром  $6 \text{ mm}$  (1), прямоугольный  $20 \times 0.1 \text{ mm}$  (2).



**Рис. 3.** Профили травления Si (1, 3) и окисленного кремния (2, 4). Газ  $\text{SF}_6$ ,  $L = 100 \mu\text{m}$ ,  $U_{rf} = 175 \text{ V}$ ,  $P_{rf} = 20 \text{ W}$ ,  $p = 2 \cdot 10^4$  (1, 2),  $4 \cdot 10^4 \text{ Pa}$  (3, 4);  $l = 100 \mu\text{m}$ ,  $d = 10 \text{ mm}$ ,  $t = 10 \text{ s}$ .

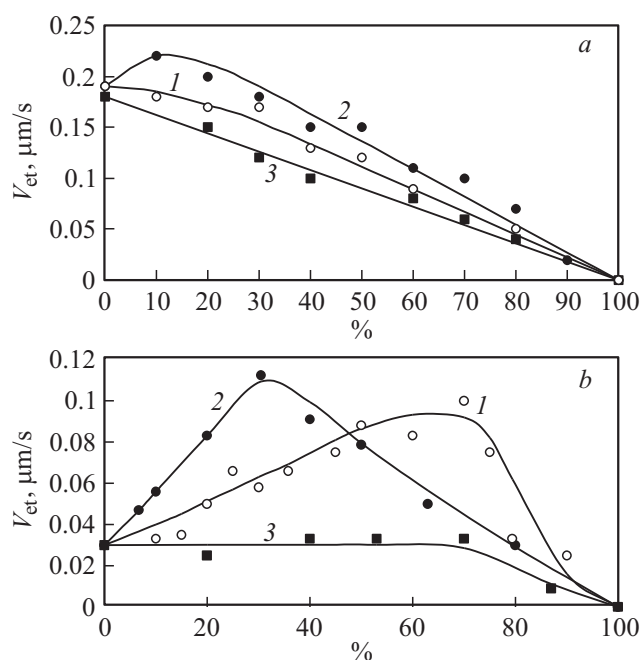
элементы поверхности находятся на расстояниях, много больших  $l$ .

Сравнение профилей канавок, полученных при травлении открытого кремния и кремния окисленного (толщина  $\text{SiO}_2 \sim 0.3 \mu\text{m}$ ) при одних и тех же режимах (рис. 3), показывает, что глубина и соответственно средняя по времени скорость травления окисленного кремния в 1.5–2 раза больше. Отметим, что время стравливания пленки  $\text{SiO}_2$  много меньше общего времени травления образцов. Анализ профилей полученных канавок показывает, что наличие  $\text{SiO}_2$  на кремнии существенно влияет на показатель анизотропии травления ( $A$ ). Отметим, что при размерном „негативном“ ТЛГР без использования масок параметр  $A$  имеет несколько иной смысл, чем при традиционном плазмохимическом травлении через маски. В работе [3] было показано, что в случае ТЛГР величину  $A$  можно определить как отношение глубины канавки травления к величине ее растрыва за пределы проекции выступающего элемента электрода на плоскость, параллельную обрабатываемой поверхности. Исходя из данного определения можно сделать вывод, что травление окисленного кремния идет с более высоким разрешением. Это связано, в частности, с тем, что в процессе травления пленки  $\text{SiO}_2$  заряженные частицы играют более важную роль, как фактор активации и очистки поверхности. Поэтому пленка  $\text{SiO}_2$  защищает кремний там, где поток ионов на поверхность недостаточен для ее удаления, т. е. за пределами зоны наиболее интенсивного горения разряда. Травление открытого кремния, как известно, может идти без ионной активации, с помощью одних нейтральных радикалов [7]. Скорость радикального травления ниже, чем в зоне горения разряда, и плавно снижается по мере удаления от электрода вследствие уменьшения концентрации ХАЧ. Результатом того, что в окисленном кремнии травится более узкая дорожка, является снижение расхода и повышение концентрации ХАЧ при одновременном ускорении отвода продуктов травления из зоны горения разряда. Эти факторы, как отмечалось выше, снижают роль локального действия так называемого „эффекта загрузки“. Кроме того, поскольку  $\text{SiO}_2$  диэлектрик, то разрядный ток стягивается

в направлении вскрытого участка кремния, так как в данном случае он является током проводимости. Это обстоятельство также приводит к увеличению скорости травления кремния на вскрытом от  $\text{SiO}_2$  участке.

Учитывая преимущественно химический характер травления локализованным разрядом, регулирование скорости можно проводить, изменяя состав газовой смеси. На рис. 4 показаны зависимости скорости травления кремния от процентного содержания различных примесей в газах  $\text{SF}_6$  и  $\text{CF}_4$ . Из рисунка видно, что влияние добавок  $\text{Ar}$ ,  $\text{O}_2$  и воздуха на скорость травления существенно различается в газах  $\text{SF}_6$  и  $\text{CF}_4$ . Так, разбавление  $\text{SF}_6$  аргоном приводит к практически линейному снижению скорости травления кремния во всем исследуемом диапазоне, в то время как в смеси с  $\text{CF}_4$  скорость травления практически не меняется при добавлении до 70% аргона. Аналогичная зависимость для смеси  $\text{CF}_4$  с аргоном наблюдалась при разных давлениях в случае применения прямоугольного электрода. Вероятно, уменьшение концентраций молекул  $\text{CF}_4$  в смеси с  $\text{Ar}$  не приводит к уменьшению концентрации атомарного  $\text{F}$ , поскольку благодаря добавлению аргона функция распределения электронов по энергиям меняется таким образом, что повышается вероятность диссоциации молекул [8]. Энергия диссоциации молекул  $\text{SF}_6$  гораздо меньше, чем  $\text{CF}_4$ , а степень диссоциации  $\text{SF}_6$  выше в несколько раз. Поэтому добавка в  $\text{SF}_6$  аргона не влияет сильно на вероятность диссоциации, но уменьшает концентрацию фтора в разряде в результате разбавления рабочего газа.

Зависимости скорости травления кремния от содержания кислорода в газах  $\text{SF}_6$  и  $\text{CF}_4$  имеют максимум,



**Рис. 4.** Зависимость скорости ТЛГР кремния от процентного содержания воздуха (1), кислорода (2) и аргона (3) в смеси с  $\text{SF}_6$  (a),  $\text{CF}_4$  (b).  $U_{rf} = 215 \text{ V}$ ,  $P_{rf} = 15 \text{ W}$ ,  $L = 100 \mu\text{m}$ ,  $p = 3 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ , электрод диаметром 6 мм.

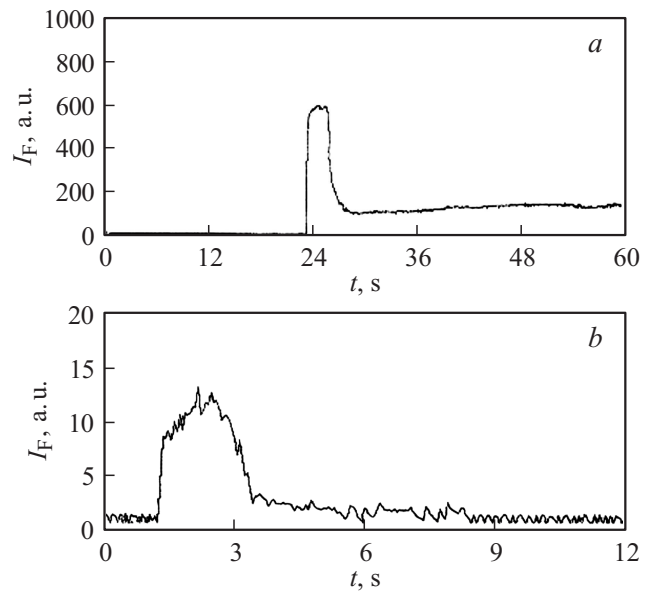
причем наиболее сильно это проявляется для  $\text{CF}_4$ . Здесь, как видно из рис. 4, *b* кривая 2, максимум скорости наблюдается при 30%  $\text{O}_2$  в смеси, а скорость травления кремния при этом увеличивается в 4 раза. Такой характер зависимости связан с тем, что добавка кислорода в исходный газ приводит к появлению в разряде большего количества свободного фтора в виде атомов и молекул. В плазме  $\text{CF}_4$  атомы фтора образуются вследствие диссоциации  $\text{CF}_4$  под действием электронного удара. Добавка небольшого количества кислорода (< 20%) вызывает сильное возрастание концентрации атомов фтора. Это возрастание и сопутствующее уменьшение концентрации радикалов  $\text{CF}$  и  $\text{CF}_2$  в плазме подтверждается изменением соответствующего оптического излучения возбужденных радикалов. При взаимодействии  $\text{O}_2$  с радикалами  $\text{CF}_x^\bullet$  освобождаются атомы фтора, а также образуются  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{COF}_2$  [9]. Влияние добавки воздуха к  $\text{SF}_6$  и  $\text{CF}_4$  на скорость травления кремния связано с действием присутствующего в нем  $\text{O}_2$ , механизм которого рассматривался выше, и  $\text{N}_2$  как разбавителя.

Исследования показали, что при сохранении постоянных температурных условий проведения процесса ТЛГР скорость травления практически не меняется со временем, если глубина травления много меньше межэлектродного расстояния. Если же вследствие травления заметно меняется длина разрядного промежутка, то это может приводить как к увеличению, так и к уменьшению скорости травления в зависимости от условий проведения процесса (рис. 1).

### Оптический контроль момента окончания слоев материалов

В случае, когда межэлектродное расстояние составляет 10–300  $\mu\text{m}$ , применение зондовых методов практически невозможно, как, впрочем, и других „контактных“ методов диагностики плазмы. Поэтому для контроля ТЛГР слоев различных материалов имеет смысл использовать спектральные методы [10]. Преимущества этих методов — относительная простота применяемой в них аппаратуры и отсутствие каких-либо воздействий на плазму со стороны приборов. Главный недостаток заключается в том, что они являются интегральными по объему. Поэтому в спектральных методах необходимо во многих случаях усложнять процедуру интерпретации результатов измерений.

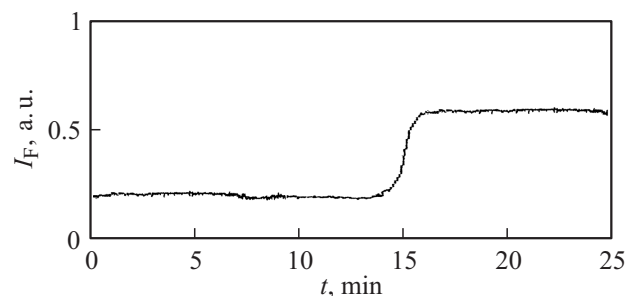
Поскольку объем ЛГР много меньше объема РК, концентрация фтора ( $n_F$ ) в разряде остается постоянной в течение длительного времени. В случае, когда ЛГР контактирует с материалом, химически взаимодействующим с образующимися в разряде компонентами, их концентрация значительно снижается. Эксперименты показали, что концентрация фтора в ЛГР  $\text{CF}_4$  и  $\text{SF}_6$  существенно зависит от обрабатываемого материала и площади подвергнутой травлению. На рис. 5 представлены зависимости  $I_F$  в разряде  $\text{SF}_6$  от времени травления структуры  $\text{SiO}_2\text{—Si}$ . Из рисунков видно, что



**Рис. 5.** Зависимость интенсивности линии фтора (703.7 нм) от времени ТЛГР структуры  $\text{SiO}_2\text{—Si}$ . *a* —  $p = 5 \cdot 10^3$  Па,  $L = 350 \mu\text{m}$ ,  $\text{SF}_6 + 4\% \text{Ar}$ ;  $d_{\text{SiO}_2} = 0.42 \mu\text{m}$ , электрод диаметром 6 мм. *b* —  $p = 5 \cdot 10^3$  Па,  $L = 350 \mu\text{m}$ ,  $\text{SF}_6 + 4\% \text{Ar}$ ;  $d_{\text{SiO}_2} = 0.42 \mu\text{m}$ , электрод  $0.1 \times 50$  мм.

после окончания травления пленки диоксида кремния величина  $I_F$  резко падает. Это связано с увеличением его расхода атомов F на травление вскрытого кремния. Из сравнения графиков *a* и *b* на рис. 5 видно, что отношение интенсивности линии фтора в период травления  $\text{SiO}_2$  к ее величине при травлении Si практически не зависит от абсолютной величины сигнала и, следовательно, от площади травления. Этот факт является еще одной отличительной особенностью процесса ТЛГР, поскольку при ПХТ и РИПТ относительное изменение  $I_F$  зависит от  $S$ .

При травлении кремния (рис. 6)  $I_F$  не меняется до момента сквозного протравливания пластины, который соответствует примерно тринадцатой минуте травления. После этого наблюдается монотонный рост  $I_F$ , который связан с уменьшением площади кремния под электродом по мере увеличения отверстия. Значительное увеличе-



**Рис. 6.** Зависимость интенсивности линии фтора (703.7 нм) от времени ТЛГР кремния.  $p = 1.5 \cdot 10^4$  Па,  $L = 300 \mu\text{m}$ ,  $\text{SF}_6 + 4\% \text{Ar}$ , электрод диаметром 6 мм.

ние  $n_F$  при уменьшении площади травления Si свидетельствует о том, что скорость процесса лимитируется диффузионной стадией.

## Заключение

Проведенные исследования показали, что ЛГР позволяет проводить травление материалов с большими скоростями, достигающими, например, в газе  $SF_6$  для Si и  $SiO_2$  соответственно 10 и  $0.5 \mu m/s$ . При этом процесс травления имеет преимущественно химическую природу, как и при широко применяемом плазмохимическом травлении. Вклад чисто физического распыления в целевой процесс ничтожно мал, что особенно наглядно демонстрирует зависимость скорости травления Si от содержания Ar в  $SF_6$  (рис. 4, а). Однако как фактор активации и очистки поверхности травления ионная бомбардировка может играть заметную роль. Благодаря доминирующей роли ХАЧ в процессе травления материалов с помощью ЛГР его скорость можно регулировать, меняя не только энергетические характеристики разряда, но и химический состав газовой смеси. В работе показано, что влияние добавок Ar,  $O_2$  и воздуха, например, на скорость травления кремния существенно различается в газах  $SF_6$  и  $CF_4$ . Преимущественно химический характер ТЛГР приводит к тому, что при переходе от травления слоя одного материала к другому наблюдается существенное изменение концентрации ХАЧ в разряде. Это позволяет эффективно использовать метод эмиссионной спектроскопии для контроля момента начала и окончания травления слоев различных материалов.

В настоящей работе в качестве обрабатываемого материала использовался главным образом Si, однако полученные в работе результаты и сделанные из них выводы отражают общие свойства и закономерности ТЛГР. Прежде всего это относится к анализу влияния на процесс ТЛГР таких физических параметров, как длина разрядного промежутка, частота ВЧ напряжения, плотность тока, давление газа и минимальный линейный размер поверхности травления. Закономерности влияния этих параметров на ход ТЛГР будут проявляться при обработке и других материалов. Учитывая высокую скорость ТЛГР, его можно эффективно использовать для быстрого удаления значительных слоев материалов как через традиционно используемые маски, так и для травления открытых поверхностей. Например, для снятия нарушенного слоя на кремниевых пластинах или для уменьшения их толщины после завершения формирования приборов на рабочей стороне.

## Список литературы

- [1] Абрамов А.В., Дикарев Ю.И., Суровцев И.С. Патент РФ № 2091904. 1997.
- [2] Абрамов А.В., Абрамова Е.А., Суровцев И.С. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 3. С. 45–48.
- [3] Абрамов А.В., Абрамова Е.А., Суровцев И.С. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 7. С. 70–74.
- [4] Абрамов А.В., Панкратова Е.А., Суровцев И.С. // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. 2011. Т. 7. Вып. 11.3. С. 13–17.
- [5] Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А. Высоочастотный емкостной разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения. М.: Изд-во Московского физ.-техн. ин-та, 1995. 320 с.
- [6] Mogaб C.J. // J. Electrochem. Soc. 1977. Vol. 124. P. 1262–1268.
- [7] Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 264 с.
- [8] Ефремов А.М., Юдина А.В., Мурин Д.Б., Дементьев О.С., Светцов В.И. // Химия высоких энергий. 2013. Т. 43. № 2. С. 147–151.
- [9] Григорьев Ю.Н., Горобчук А.Г. // Микроэлектроника. Т. 36. № 5. С. 368–379.
- [10] Орешникова Е.Г. Спектральный анализ. М.: Высшая школа, 1982. 375 с.