

УДК 621.382

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ ВО ВНЕЭЛЕКТРОДНОЙ ПЛАЗМЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

Колпаков¹ В.А., Подлипов^{1,2} В.В.

¹ Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), г. Самара

² Институт систем обработки изображений РАН, г. Самара

Традиционные плазменные технологии, базирующиеся на ВЧ, СВЧ и магнетронном разряде обладают такими существенными недостатками как эффект загрузки, невозможность травления разных материалов в одной рабочей камере, необходимость жесткого контроля большого количества регулируемых и нерегулируемых рабочих параметров [1, 2]. Согласно [2], у внеэлектродной плазмы, формируемой высоковольтным газовым разрядом перечисленные недостатки отсутствуют, поэтому она нашла широкое применение в технологиях пайки полупроводниковых элементов, очистки поверхности материалов, увеличении адгезии тонких пленок. В работах [1, 2] показана возможность применения внеэлектродной плазмы в технологиях формирования оптического микрорельефа на диоксиде кремния, карбиде кремния и алмазоподобных пленках. Однако в данных работах отсутствуют подробные результаты исследования механизмов и процессов, протекающих при травлении кремния во внеэлектродной плазме. В данной работе проведены предварительные исследования процессов травления кремния во внеэлектродной плазме.

Для проведения исследований использовались специально подготовленные образцы монокристаллического кремния, поверхность которого ориентирована по кристаллографической плоскости (100). На поверхности пластин методами фотолитографии формировалась бинарная фоторезистивная маска (рис. 1, а) с периодом отверстий 3 мкм, глубиной 750 нм, диаметр 2,25 мкм. Сформированные структуры подвергались обработке во внеэлектродной плазме с энергией частиц 100-500 эВ и равномерностью их распределения по сечению потока плазмы не хуже 95%. В качестве рабочего плазмообразующего газа использовалась смесь хладона-14 (CF₄) и кислорода (O₂) в соотношении 80% и 20% соответственно. Для устранения излишнего нагрева образцов в процессе травления они размещались на водохлаждаемом подложкодержателе. Время травления всех образцов составляло 10 мин. После операции травления проводилась отмывка образцов с использованием ультразвука от остатков фоторезиста в чистом ацетоне при температуре 80°С, в изопропиловом спирте и в проточной бидистиллированной воде. Контроль параметров резистивной маски и микрорельефа после травления осуществлялся с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Carl Zeiss Supra 25. Виды полученных микропрофилей представлены на рис. 1, b, c, d. Измерение параметров глубины и наклона осуществлялось с помощью силового зондового микроскопа Solver Pro. Анализ представленных результатов (рис. 1, c) показал, что в процессе травления при использовании режимов газоразрядного устройства со значениями ускоряющих напряжений $U \leq 700\text{В}$ наблюдается наименьшая глубина рельефа, измеренное значение которой составляет 200 нм. Низкая скорость травления кремния в данном случае обусловлена малой энергией фторсодержащих ионов, и низкой концентрацией ХАЧ высоковольтного газового разряда, что коррелирует с данными работы [1, 2]. При напряжении $U=1100\text{В}$ и токе $I=190\text{мА}$ (рис. 1, d) наблюдается увеличение глубины травления до 350 нм. Однако при этом происходит повышение степени шероховатости, которое вызвано, по-видимому, недостаточной скоростью удаления пассивирующего низлежащего слоя адсорбированных комплексов Si-F₂ [3]. Дальнейшее повышение энергии частиц плазмы путем увеличения напряжения на электродах устройства до 2000В интенсифицирует процессы удаления продуктов реакции, за счет физического распыления, повышения миграционной способности адсорбированных комплексов Si-F₂ и их последующего объединения до легколетучих соединений Si-F₄ [1, 2, 3].

Таким образом, в режиме $U=2000\text{В}$, $I=80\text{мА}$ становится преимущественным механизм реактивного ионного травления, позволяющий получать микропрофили приемлемого качества, даже при незначительном значении тока газоразрядного устройства (рис. 1, б).

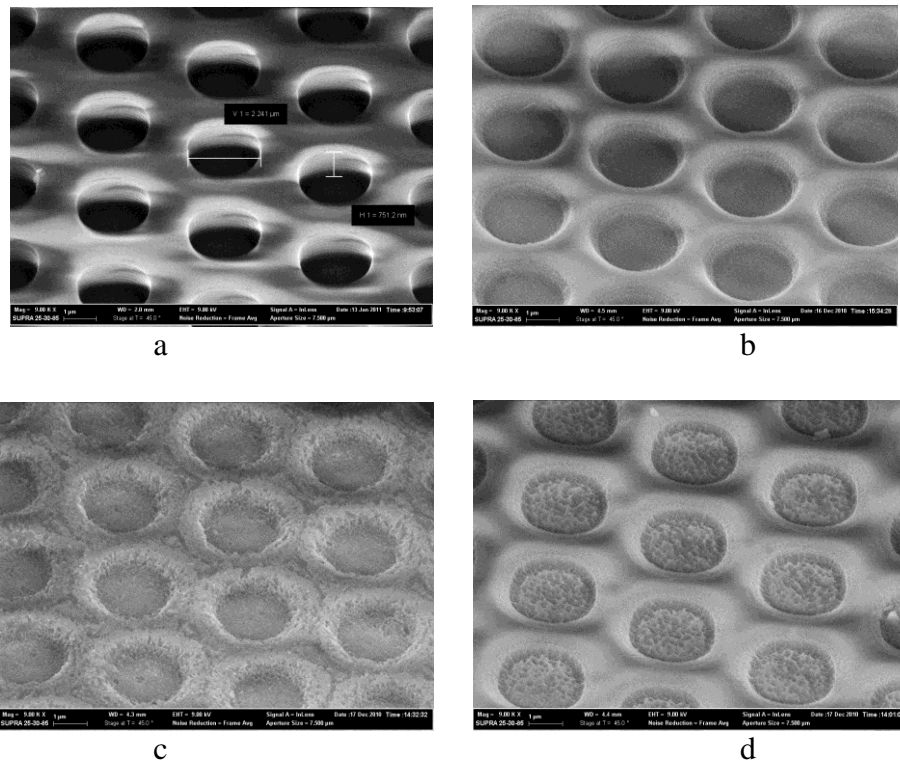


Рисунок 1. Изображения поверхности кремния на РЭМ:
а – кремний с фоторезистивной маской на поверхности;
б, с, d – после обработки в плазме ВГР при различных значениях тока разряда и напряжения
(б – $I = 80\text{ мА}$, $U = 2000\text{ В}$; с – $I = 190\text{ мА}$, $U = 700\text{ В}$; d – $I = 190\text{ мА}$, $U = 1100\text{ В}$).

Представленный на рис. 1, б микрорельеф имеет глубину 600 нм , шероховатость её поверхности не превышает 40 нм . Отклонение боковых стенок от вертикали составляет 20° и обусловлен переотражением и отклонением заряженных частиц плазмы от боковых стенок резистивной маски, накапливающей поверхностный заряд. Дальнейшее повышение тока и напряжения газоразрядного устройства не приводит к улучшению качества формируемого микрорельефа вследствие сильного разогрева поверхности и деградации резистивной маски. Следовательно, наиболее приемлемым для травления кремния во внеэлектродной плазме на данном этапе исследований можно считать режим $U=2000\text{В}$, $I=80\text{мА}$.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МД-1041.2011.2, а также гранта Карл Цейсс №7/11 КЦ.

Список литературы

1. Казанский Н.Л., Колпаков А.И., Колпаков В.А. Исследование особенностей процесса анизотропного травления диоксида кремния в плазме газового разряда высоковольтного типа // Микроэлектроника. – 2004. – Т. 33. – № 3. – С. 218-233.
2. Казанский Н.Л., Колпаков В.А. Формирование оптического микрорельефа во внеэлектродной плазме высоковольтного газового разряда. Монография. – М.: Радио и связь, 2009. – 220 с.
3. Амиров И.И., Морозов О.В., Изюмов М.О., Кальнов В.А., Орликовский А.А., Валиев К.А. // Плазменные процессы глубинного травления Si и SiO₂ для целей микротехнологии. // Квантовые компьютеры, микро- и нанoeлектроника: физика, технология, диагностика и моделирование. Ред. Орликовский. М.Наука, 2005 (ФТИАН; Т18). С.173-189.