

10; 12

© 1991

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОМЕТРОВЫХ СТРУКТУР
В НЕОРГАНИЧЕСКОМ РЕЗИСТЕ

Т.Б. Борзенко, В.И. Николайчик

В настоящее время основным методом получения структур размером 1–100 нм является электронно-лучевая литография. Высокую разрешающую способность имеют неорганические резисты, в частности, фторид алюминия, в котором могут быть сформированы элементы с характерным размером несколько нанометров [1, 2]. В данной работе исследовалось воздействие пучка электронов на AlF_3 в различных режимах экспонирования при формировании нанометровых структур в этом резисте.

Эксперименты проводились при ускоряющем напряжении 100 кВ в модифицированном для электронно-лучевой литографии [3] растровом просвечивающем электронном микроскопе NB501 фирмы *VG Microscopes* с катодом полевой эмиссии при давлении в камере образцов $2 \cdot 10^{-7}$ Па. Минимальный диаметр электронного зонда, определенный из экспериментов с использованием кубических микрокристаллов MgO , равнялся 0.5–1 нм. Для приготовления образцов использовались углеродные мембраны толщиной 50 нм и пленки SiO_2 или Si_3N_4 толщиной 50–70 нм, нанесенные на пластины кремния ориентации (100); с другой стороны пластины были покрыты слоем окисла. Методом фотолитографии на обратной стороне пластины вскрывались окна в резисте и окисле и последующим анизотропным травлением кремния через окна до слоя или нитрида на другой стороне пластины были получены тонкие мембраны размером 300×200 мкм². На мембраны каждого типа термическим напылением в вакууме наносился слой AlF_3 толщиной 50–70 нм. Общая толщина резиста с мембраной не превышала 200 нм, что позволяло наблюдать сформированные структуры „на просвет” и получать спектры потерь энергий прошедших через образец электронов (EELS –спектры).

На рис. 1 представлены различные типы структур, сформированные в слое резиста при однократном проходе пучка электронов при токе пучка $I_{\text{п}} = 250 \cdot 10^{-12}$ А и времени экспозиции на точку $t_{\text{экс}} = 40$ мс. Под воздействием электронного пучка произошло удаление резиста с экспонируемого места, вследствие чего на изображении наблюдается сильное просветление участков экспонирования. Как видно из рис. 1, минимальный характерный размер элементов составляет 6–7 нм при отношении высоты элемента резиста к его ширине, близком к 10 : 1. Вокруг области полного удаления резиста наблюдается слабо просветленная область размером 12–15 нм

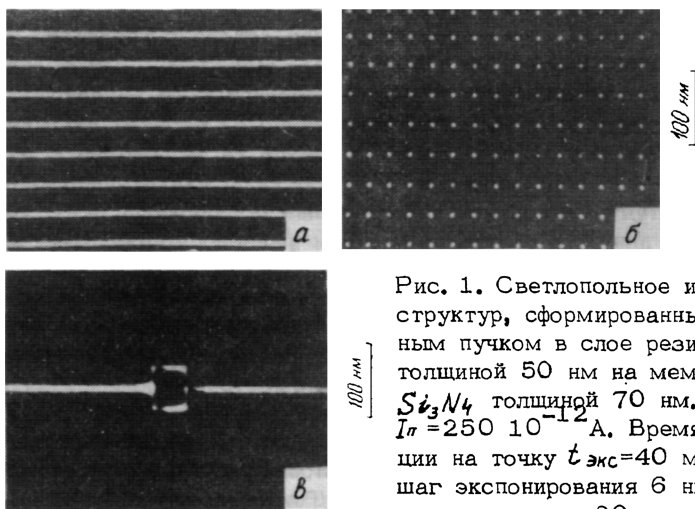


Рис. 1. Светлопольное изображение структур, сформированных электронным пучком в слое резиста AlF_3 толщиной 50 нм на мембране из Si_3N_4 толщиной 70 нм. Ток пучка $I_p = 250 \cdot 10^{-12}$ А. Время экспозиции на точку $t_{\text{экс}} = 40$ мс. а, в – шаг экспонирования 6 нм, б – шаг экспонирования 30 нм.

со свойствами, отличающимися от свойств AlF_3 . Отличие состоит в том, что эту область с измененными свойствами нельзя проэкспонировать с аналогичным результатом при тех же условиях экспонирования. Размер этой области фактически определяет разрешающую способность AlF_3 . Экспонирование системы параллельных линий с разным расстоянием между ними показало, что при перекрытии соседних областей с измененными свойствами возникают разрывы линий. При экспонировании двух пересекающихся линий та линия, которая рисуется второй, имеет разрывы около места пересечения, величина которых определяется размером области с измененными свойствами. Анализ спектров потерь энергий прошедших электронов показал, что под воздействием пучка электронов происходит разложение AlF_3 по механизму радиолиза [4] на ионную и катионную составляющие с последующим выделением металлического алюминия, дающего характерный пик потерь энергий 15.3 эВ. С помощью детектора светлого поля, регистрирующего пучок после прохождения электронного спектрометра, наблюдался процесс удаления резиста в зависимости от времени экспонирования. Для этого программой персонального компьютера при соответствующем выборе значений для цифро-аналоговых преобразователей в цепи развертки электронный зонд устанавливался в точке на неэкспонируемом месте, и запускалась работа аналого-цифрового преобразователя с последующим измерением величины сигнала через заданные временные интервалы. На рис. 2, а эта зависимость представлена при широкой щели в спектрометре, пропускающей электроны всех энергий. Величина сигнала в этом случае определяется толщиной образца (мембрана плюс резист), через который проходит пучок электронов. График на рис. 2, а характеризуется наличием трех областей: область 1 – относительно медленное нарастание сигнала,

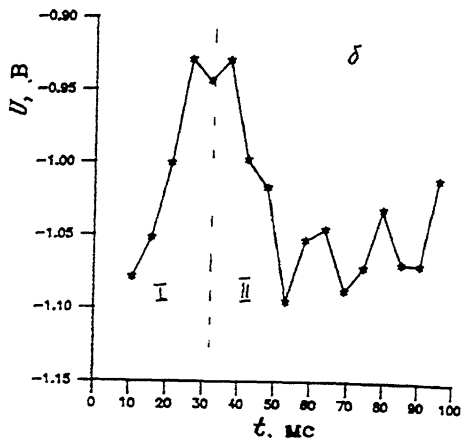
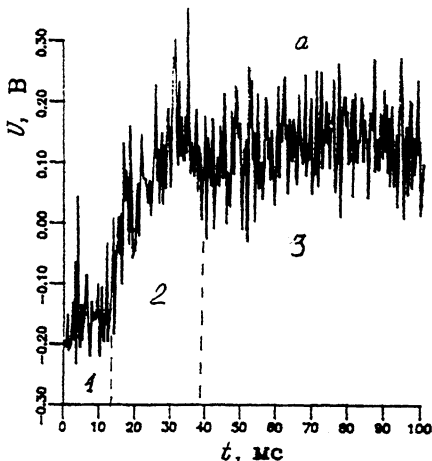


Рис. 2. а - зависимость сигнала детектора светлого поля от времени при неподвижном электронном зонде. Ток пучка $I_n = 250 \times 10^{-12}$ А. б - зависимость времени полного удаления резиста от величины тока электронного пучка. - - экспериментальные точки; * - усредненные значения.

где практически не происходит удаления резиста; область 2 - быстрое нарастание сигнала, когда собственно и происходит экспонирование резиста; область 3 - стационарное значение после удаления резиста.

На рис. 2, б представлен график зависимости сигнала детектора от времени экспонирования при узкой щели спектрометра, пропускающей только электроны, потерявшие энергию на возбуждении плазмона в металлическом алюминии. При такой настройке спектрометра сигнал детектора дает информацию о количестве алюминия в точке экспонирования или распределении алюминия по экспонированной площади (изображение в лучах алюминия). Такие изображения дают качественную картину распределения алюминия после экспонирования AlF_3 электронным пучком, на которой видны области накопления металлического алюминия. График рис. 2, б позволяет наблюдать кинетику образования, накопления на облученном участке и, наконец, удаления металлического алюминия с этого участка в зависимости от времени экспонирования. Этот график можно разделить на две области: область I, где идет накопление металлического алюминия с увеличением времени экспонирования - характерное поведение негативного резиста; и область II - удаление металлического алюминия, а, следовательно, постепенное уменьшение до нуля остаточной толщины пленки с увеличением времени экспозиции - поведение AlF_3 как позитивного резиста. Таким образом, зависимость, представленная на рис. 2, б, дает количественную оценку процесса, позволяет четко разграничить дозы экспозиции, при которых AlF_3 ведет себя как негативный резист, и дозы, при которых

он проявляет свойства позитивного резиста. Такие динамические кривые были получены нами для различных значений тока пучка.

Изучение распределения алюминия показало, что при неполном удалении резиста (экспонирование осуществляется до начала области 3 на рис. 2, а) алюминий выделяется, в основном, в области нахождения пучка электронов и, частично, в соседних с ней областях. При оптимальном выборе дозы можно достигнуть минимального размера сформированных металлических полосок или точек, равного 6–7 нм. При полном удалении резиста с облученных участков (экспонирование, соответствующее области 3 на рис. 2, а) металлический алюминий выделяется по границе экспонируемой области в виде полоски шириной 4–5 нм, в то время как ширина области с измененными свойствами вокруг этих участков составляет 12–15 нм. Более светлый контраст этой области по сравнению с контрастом неэкспонированных участков указывает, как можно предположить, что в этих областях происходит частичное удаление фтора.

Результаты работы подтверждают возможность получения структур в AlF_3 размером 6–7 нм. Получены динамические кривые, характеризующие зависимость количества алюминия, выделяющегося при разложении резиста на облучаемом участке, от времени экспонирования. Экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что определяющим в формировании структур в самопроявляющемся неорганическом резисте AlF_3 является процесс диффузии образующегося под действием электронного пучка металлического алюминия. Для более точного описания процесса экспонирования, которое особенно необходимо для формирования структур произвольной формы, требуется развитие количественной модели, включающей взаимодействие электронов с резистом, диффузию ионов металла и удаление галогенной составляющей, образование металлического кластера.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] K r a t c h m e r E., I s a a c s o n M. // J. Vac. Sci. Technol. 1986. V. 4. N 1. P. 361–364.
- [2] M a s a u l a y J.M., A l l e n R.M., B r o w n L.M., B e r g e r S.D. Proceedings of Microcircuit Engineering-88, 1988. P. 557–560.
- [4] Н и к о л а й ч и к В.И. Мат. XIУ Всесоюз. конф. по электронной микроскопии. Суздаль, 1990. С. 48–49.
- [5] H o b b s L.W. // Ultramicroscopy. 1978. V. 3. N 3. P. 381–386.

Поступило в Редакцию
9 апреля 1991 г.