

06;12

Влияние электронного облучения вакуумного резиста NOVER-1 на его стойкость к ионно-лучевому травлению

© Ю.И. Коваль, В.Т. Петрашов

Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН,
142432 Черноголовка, Московская область, Россия

(Поступило в Редакцию 19 мая 1997 г.)

Было изучено влияние облучения электронами на стойкость резиста NOVER-1 к ионно-лучевому травлению. Для травления использовались ионы Ag с энергиями от 300 до 2500 eV. Было обнаружено, что в зависимости от энергии ионов и угла их падения на поверхность резиста электронное облучение может приводить как к ускорению, так и к замедлению травления NOVER-1. Наблюдается четкая корреляция между глубиной проникновения ионов в резист и характером влияния облучения электронами на стойкость резиста к травлению. При энергии ионов больше 500 eV (глубина проникновения ионов $\gtrsim 3.5$ nm) стойкость уменьшается, при небольших дозах электронного облучения проходит через минимум и возвращается к скорости травления исходного резиста при больших дозах электронного облучения. При скользких углах травления ($\sim 70^\circ$ к нормали поверхности) и малой энергии ионов (300 eV), т.е. при малой глубине проникновения ионов ($\lesssim 2.5$ nm), облученный электронами резист травится медленнее исходного во всем диапазоне исследованных доз электронного облучения. Этот эффект может быть использован для структур в резисте с высотой больше ширины с целью увеличения их стойкости, которая в данном случае определяется преимущественно скоростью травления наклонных фасеток.

Одной из важных характеристик резистов является их стойкость к ионно-лучевому травлению. Известно, что полимерные резисты обладают относительно невысокой стойкостью к ионно-лучевому травлению и в случае использования резистов в качестве масок травления это оказывается серьезным недостатком. Для удовлетворения требований к стойкости можно использовать толстые резисты. Однако для субмикронных и особенно нанометровых размеров увеличение толщины резистов приводит к ухудшению разрешения литографии и поэтому оказывается практически неприемлемо. Кроме того, толстые маски приводят к проявлению ряда хорошо известных негативных эффектов, таких как перепыление, образование канавок по периметру структур за счет переотражения ионов от высоких стенок резиста, существенное отличие в стойкости структур разного размера из-за проявления эффекта фасетирования (см., например, [1]).

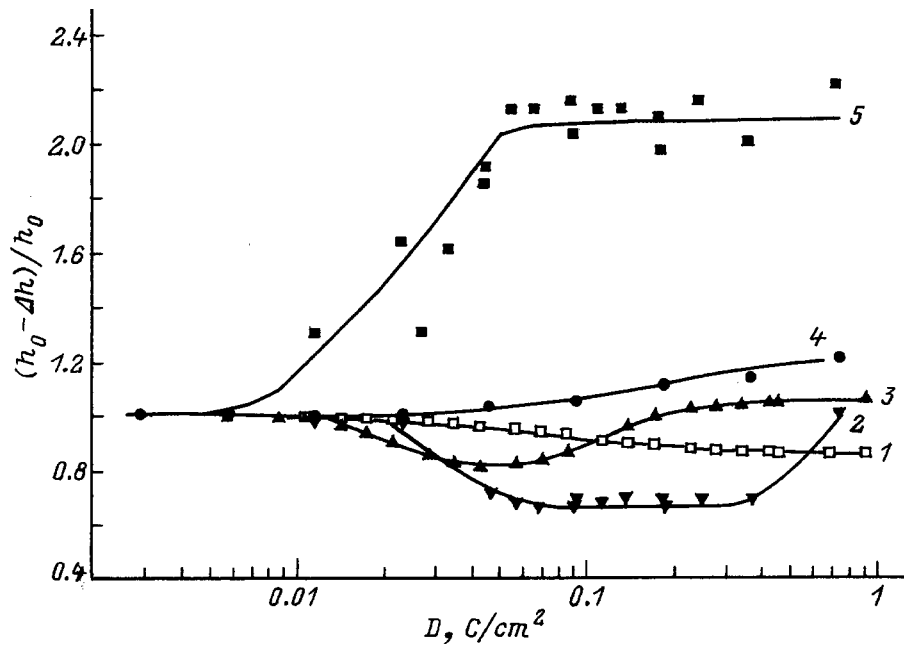
Возможность улучшения стойкости резистов ранее рассматривалась неоднократно [2–4], однако понимание механизмов травления полимерных материалов явно недостаточно для целенаправленного поиска. В настоящее время можно с уверенностью утверждать, что низкая стойкость резистов во многом обусловлена природой полимерных материалов и ионно-лучевое травление полимеров не сводится к физическому распылению, а во многом определяется радиационно-стимулированными процессами в приповерхностном слое материала [5].

Изучение влияния различных видов излучения на стойкость резистов к ионно-лучевому травлению может давать информацию о механизмах травления полимерных материалов. Поэтому исследование влияния электронного облучения на стойкость материалов к ионно-

лучевому травлению нам представляется актуальной задачей. Кроме того, электронное облучение структур в резисте представляет и практический интерес. Так, ранее было показано, что электронное облучение структур в таком электронном резисте, как полиметилметакрилат, позволяет улучшить их маскирующие свойства [5]. При этом улучшалось поведение резиста при нагреве во время ионно-лучевого травления и уменьшалось влияние эффекта фасетирования.

В качестве объекта исследований в данной работе был выбран резист NOVER-1 (negative organic vacuum E-beam resist). NOVER-1 был разработан как резист для электронно-лучевой литографии, позволяющей реализовать полностью сухой вакуумный цикл — нанесение, экспонирование, проявление и травление. В последних работах было показано, что наряду с преимуществами, присущими вакуумному резисту (возможность равномерного нанесения на поверхности сложной топологии, отсутствие контактов с жидкостными проявителями и возможность избежать контакта образцов с воздухом), NOVER-1 обладает высоким разрешением (лучше 30 nm) и образует сплошные стабильные пленки толщиной менее 30 nm [6,7].

В наших экспериментах резист толщиной около $0.3 \mu\text{m}$ наносился термическим испарением из лодочки при температуре 150°C . В качестве подложек использовались Si пластины. Электронное облучение проводилось в релятивистской электронной машине BS-300 с подключенной системой программного управления пучком. Энергия электронов составляла 16 keV, ток пучка — 300 pA. Экспонировались участки размером $15 \times 20 \mu\text{m}$ дозами от $3 \cdot 10^{-3}$ до $9 \cdot 10^{-1} \text{C/cm}^2$. Далее резист травился ионами Ag^+ с энергиями 300–2500 eV в уста-



Зависимости толщины пленки резиста (1), стойкости резиста к ионно-лучевому травлению (2–5) от дозы электронного облучения. Травление проводилось по нормали к поверхности резиста ионами с энергией 2500 (2), 500 (3), 300 eV (4) и под углом 70° по отношению к нормали к поверхности с энергией 500 eV (5).

новке ионно-лучевого травления [8]. Разница в скоростях ионно-лучевого травления необлученных и облученных областей приводила к образованию рельефа на Si подложке. После полного стравливания резиста измерялась разность высот между необлученными и облученными областями Δh с помощью оптического интерферометра. Измерялась также глубина травления Si на участках, не защищенных резистом, h . Стойкость резиста определялась как $(h_0 - \Delta h)/h_0$. Данная методика позволяет получать на одном образце экспериментальные точки для одной энергии ионов в заведомо одинаковых условиях экспонирования и травления на пленке резиста с одной исходной толщиной.

В результате электронного облучения толщина резиста незначительно уменьшается (кривая 1 на рисунке). Кинетики утонения описывается логарифмической зависимостью $H(D) = H_0 \cdot (1 - A \cdot \ln(1 + D/D_0))$, где H_0 — исходная толщина резиста, A и D_0 — параметры, D — доза электронного облучения. Известно, что утонение является следствием радиационно-стимулированной деструкции. Образующиеся низкомолекулярные фрагменты покидают резист, а пустоты заполняются окружающими молекулами, что и приводит к уменьшению объема материала (в нашем случае толщины резиста). Оценки по методу, предложенному в [9], показывают, что радиационный выход g_e газообразования NOVER-1 в пересчете на один атом в составе летучих фрагментов составляет 0.45 атомов на 100 eV поглощенной энергии. Сравнение с другими резистами позволяет говорить об относительно высокой стойкости NOVER-1 к радиационной деструкции (например, для полиметилметакрилата $g_e = 12$).

Скорость ионно-лучевого травления органических материалов коррелирует с их стойкостью к радиационной деструкции. Это следствие того, что травление резистов происходит в результате одновременно протекающих процессов физического распыления и образования слабосвязанных низкомолекулярных фрагментов, которые могут десорбироваться. Поэтому высокая стойкость к радиационной деструкции является одной из причин относительно высокой стойкости NOVER-1 к ионно-лучевому травлению. Так, для ионов с энергией 300 eV скорость травления составляет 19 nm/min, для 500 eV — 38 nm/min, для 2500 eV — 97 nm/min в пересчете на плотность ионного тока 1 mA/cm².

Исследуемый резист является негативным, поэтому при электронном облучении в нем наряду с деструкцией происходят процессы сшивания, которые являются доминирующими. При больших дозах облучения резист преобразуется в сильносшитую углеводородную сетку, в которой при ионно-лучевом травлении образование слабосвязанных фрагментов менее вероятно и можно было бы ожидать повышения стойкости к ионно-лучевому травлению. Однако, как показали эксперименты, влияние электронного облучения на стойкость к ионно-лучевому травлению в значительной степени определяется условиями травления — энергией и углом падения ионов.

При ионно-лучевом травлении ионами с энергией 2500 eV наблюдается уменьшение стойкости на $\sim 30\%$ при дозах более $3 \cdot 10^{-2}$ C/cm² с выходом на плато в области доз $5 \cdot 10^{-2}$ – $4 \cdot 10^{-1}$ C/cm². Дальнейшее увеличение дозы предварительного электронного облучения приводит к росту стойкости практически до исходного состояния. Аналогичная зависимость наблюдается

для ионов с энергией 500 eV. Однако на зависимости отсутствует плато в области минимума, уменьшение стойкости происходит только на $\sim 20\%$, а рост стойкости начинается с гораздо меньших доз ($6 \cdot 10^{-2}$ C/cm²). При уменьшении энергии ионов до 300 eV минимум пропадает и стойкость с увеличением дозы электронного облучения монотонно возрастает. И наконец, при травлении под углом 70° к нормали к поверхности образца ионами с энергией 500 eV стойкость возрастает более чем в два раза с выходом на насыщение в области доз $6 \cdot 10^{-2}$ C/cm².

Таким образом, наблюдается четкая корреляция характера зависимости стойкости резиста к ионно-лучевому травлению от дозы электронного облучения с глубиной проникновения ионов. При травлении под углом 70° (500 eV) ионы проникают на глубину менее 1 nm и наблюдается существенное увеличение стойкости. При нормальном падении 300 eV ионы проникают на большую глубину — около 2.5 nm, а стойкость резиста по-прежнему возрастает, но уже существенно слабее. Когда ионы проникают на глубину 3.5 nm (500 eV), начинает наблюдаться немонотонность в изменении стойкости, более того, в отличие от предыдущих случаев она уменьшается в некотором диапазоне доз. Наиболее сильно это проявляется для ионов с энергией 2500 eV, глубина проникновения которых в резист составляет более 7 nm. В этом случае диапазон доз электронного облучения, в котором стойкость резиста уменьшается, становится существенно больше, а на зависимости, как уже ранее говорилось, появляется плато.

Несмотря на обнаруженную связь между поведением стойкости резиста и глубиной проникновения ионов, имеющихся данных недостаточно для объяснения наблюдаемых особенностей. Однако наблюдаемый эффект может быть использован для упрочнения масок из резиста NOVER-1 при малых (менее толщины резиста) размерах структур. В этом случае стойкость определяется в основном стойкостью к травлению фасеток на краях структур, нормаль к которым по отношению к пучку составляет 60–70°. Возможность повысить стойкость краев структур более чем в 2 раза приводит к увеличению до 2 раз стойкости масок. Кроме того, упрочнение стенок позволяет уменьшить уход размеров для структур с размерами порядка и более толщины пленок резиста.

Список литературы

- [1] Плазменная технология в производстве СБИС. Пер. с англ. / Под ред. Н. Айнспрука и Д. Брауна. М.: Мир, 1987. 469 с.
- [2] *Borzenko T.B., Vyatkin A.F., Gonchakova N.N.* et al. // *Vacuum*. 1988. Vol. 38. P. 1007–1009.
- [3] *Beale M.I.J., Broughton C., Pidduck A.J., Deshmukh V.G.I.* // *Nucl. Instr. and Meth.* 1987. Vol. B19/20. P. 995–1000.
- [4] *Gokan H., Tanigaki K., Ohnishi Y.* // *Sol. St. Technol.* 1985. N 5. P. 163–167.

- [5] *Borzenko T.B., Koval Y.I., Kudryashov V.A.* *Microelectronic Engineering*. 1994. V. 23. P. 337–340.
- [6] *Petrashov V.T., Abramenko Y.T., Zarubin V.A.* et al. // *Phys. Low-Dim. Struct.* 1994. N 11/12. P. 103–108.
- [7] *Petrashov V.T., Abramenko Ju.T., Koval Ju.I., Aparshina L.* // *Microelectronic Engineering*. 1997. Vol. 35. P. 161–163.
- [8] *Коваль Ю.И., Ильичев Е.В.* // ПТЭ. 1994. № 3. С. 118–125.
- [9] *Борзенко Т.Б.* Канд. дис. Черноголовка, 1996.