

10;11;12

О формировании объемных элементов микроэлектромеханических систем в полиимиде методом реактивного ионно-лучевого травления

© А.И. Стогний, Т.И. Ореховская, Ю.В. Тимошков, С.В. Корякин

Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси, Минск
E-mail: stognij@ifftp.bas-net.by

Поступило в Редакцию 1 августа 2000 г.

Экспериментально решается основная задача получения микроэлектромеханических систем — формирование анизотропного профиля с отвесными боковыми стенками и чистым дном в толстом слое резиста. Показано, что указанная цель достигается путем оптимизации параметров реактивного ионно-лучевого травления слоев полиимида толщиной до $50\ \mu\text{m}$. Последнее подтверждается на примере формирования объемных деталей микроэлектродвигателя с использованием травления полиимида пучком ионов кислорода (плотность тока ионного пучка $j = 0.5\ \text{mA/cm}^2$, напряжение экстракции ионов $U = 800\ \text{V}$).

Актуальность работ по созданию новых и совершенствованию уже имеющихся методов плазменного травления пленок органических материалов обусловлена развитием микроэлектроники как по пути миниатюризации, так и по пути интегрирования с другими областями. Примером последнего являются исследования по созданию нового типа устройств — микроэлектромеханических систем (МЭМС), в которых сочетаются микроэлектронные и миниатюрные механические компоненты [1,2]. Для их изготовления особую важность, с научной точки зрения, приобретает задача получения в органической полимерной пленке, толщина которой составляет от десятков до сотен микрометров, формы будущего элемента МЭМС с анизотропным профилем. В микроэлектронике методы анизотропного плазменного травления применяются обычно для травления резистивных слоев толщиной порядка одного микрометра [3]. Формирование требуемого профиля протекает здесь не более чем за одну или несколько минут. Поэтому в силу скоротечности процесса проблемы, связанные с отводом тепла от слоя полимера и с

модификацией его структуры, инициируемой плазменным воздействием, не являются, по крайней мере, первостепенными [4,5]. Однако при травлении более толстых слоев картина существенно усложняется. Так, в работе [6] показано, что при травлении в кислородной плазме пленок полиамидокислоты толщиной более $6.0 \mu\text{m}$ наблюдается эффект взрывного ускорения процесса травления. Взрывная кинетика травления обусловлена протеканием в объеме пленки химической реакции. Последняя, в свою очередь, ускоряется из-за нагрева образца, вызванного протеканием на поверхности экзотермических реакций окисления. В [6] указывается, что температура поверхности может достигать 600 К при температуре образца менее 450 К. Это нужно учитывать при рассмотрении стойкости полимера и металлической маски во время длительного травления реальных структур. Следует также отметить, что травление толстых ($10 \dots 100 \mu\text{m}$) слоев органических полимерных пленок в смесях газов кислорода и аргона, когда, согласно [6], взрывного увеличения скорости травления не наблюдается, протекает более медленно, чем в кислородной атмосфере. Поэтому длительность процесса травления, согласно оценкам по результатам работ [4–6], будет составлять от нескольких десятков до нескольких сотен минут. За это время, ко всему прочему, материал металлической маски из-за распыления ионами аргона будет непрерывно поступать на открытую поверхность полимерной пленки, существенно изменяя кинетику травления. Толщина распыленного слоя металлической маски может составить при этом сотни нанометров.

В настоящей работе показано, что метод реактивного ионно-лучевого травления (РИЛТ) позволяет формировать в полиимиде со стандартной маской из алюминия требуемые профили элементов МЭМС.

Полиимидные пленки толщиной до $50 \mu\text{m}$ на основе пиромеллитового диангидрида и диаминодифенилоксида наносились центрифугированием на стандартные пластины кремния диаметром 100 mm. Имидизация осуществлялась в атмосфере азота при температуре 620 К. Предварительно на поверхность пластин термическим методом осаждались переходной слой меди толщиной $1.0 \mu\text{m}$ и адгезионный слой хрома толщиной $0.2 \mu\text{m}$. На поверхности полиимидной пленки стандартными методами термоосаждения и литографии формировалась алюминиевая маска толщиной $0.8 \mu\text{m}$ с рисунком элементов МЭМС. Процесс РИЛТ проводился с использованием модифицированного варианта широкоапертурного источника ионов с холодным полым като-

дом [4]. Рабочий газ (кислород или его смесь с аргоном) напускался через источник ионов. Плотность тока пучка ионов j изменялась от 0.2 до 0.8 mA/cm², напряжение экстракции ионов U изменялось от 400 до 2000 V. Контроль температуры образцов осуществлялся контактным методом посредством термодатчиков. Предварительные эксперименты показали, что нагрев образцов в процессе травления до температуры более 400 K приводит к отслоению и растрескиванию маски. Поэтому в дальнейшем путем чередования стадий травления и охлаждения в едином вакуумном цикле поддерживалась предельная температура образцов не более 350 K. Состояние образцов после различных стадий травления анализировалось методами оптической (при помощи поляризационного микроскопа NU-2) и растровой электронной микроскопии (при помощи электронного микроскопа "Nanolab-9").

На рис. 1 приведены изображения характерных участков фигур в полиимиде, полученных в процессе оптимизации параметров ионного облучения (угол съемки 60°, алюминиевая маска удалена). Ранее в работе [4] было установлено, что оптимальные режимы травления тонкого слоя полиимида обеспечиваются при использовании кислорода с 20%-ной добавкой аргона, $j = 0.4$ mA/cm² и $U = 2000$ V. На рис. 1, а показан профиль, полученный в указанном режиме травления. Профиль имеет высоту более 20 μm и отвесные боковые стенки без клина травления. Однако боковые стенки обладают неоднородной структурой, которую визуально можно разделить на три основных слоя. Нижний слой сохраняет структуру исходного полиимида. Тонкий верхний и толстый средний слои в различной степени модифицированы по сравнению с исходным состоянием. Причина модифицирования и расслоения полиимида может заключаться в быстром отводе тепла, выделяющегося в маске в результате ионного облучения, его накоплении в объеме полиимида и его эффективном отводе через адгезионный слой хрома в подложку и далее — в подложкодержатель. В результате возникают термонапряжения, приводящие к расслоению полиимида, к ухудшению условий отвода тепла из объема последнего и к перераспределению тепловых потоков в маске. Для устранения этого недостатка достаточно определить менее жесткие режимы ионного облучения. Но кроме этого (рис. 1, а), дно профиля покрыто крупными частицами округлой формы. Как показали наблюдения при помощи оптического микроскопа, частицы имеют темный цвет, механически плохо связаны с поверхностью и легко

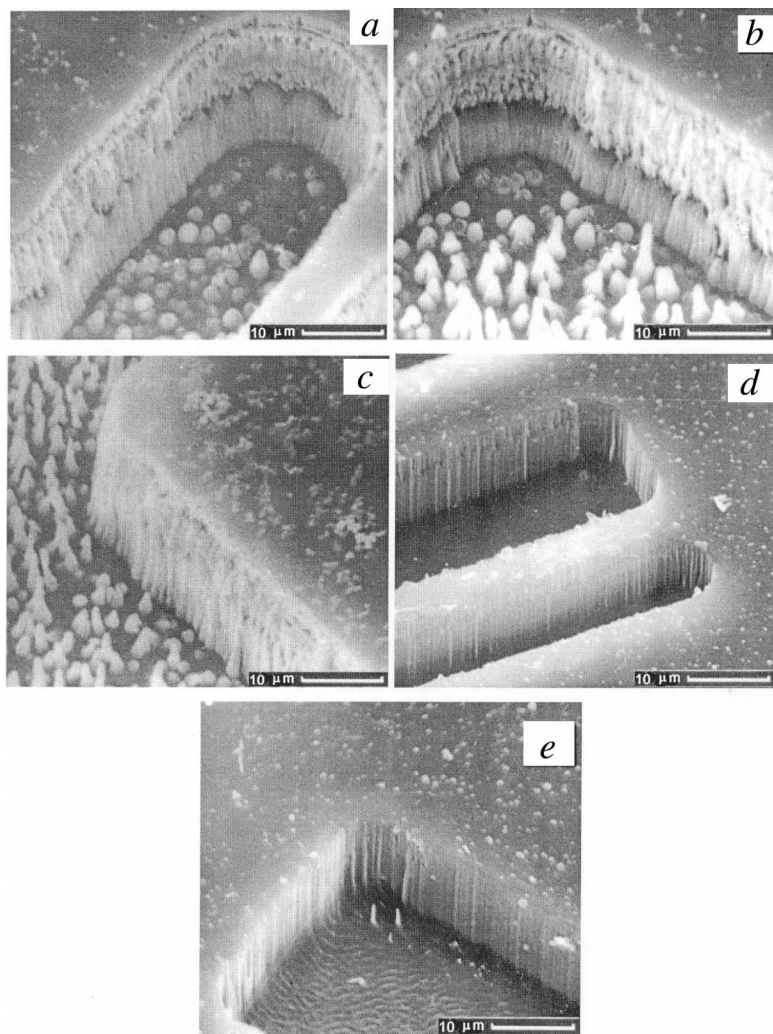


Рис. 1. Объемные фигуры в полиимиде, полученные методом реактивного ионно-лучевого травления (*a* — рабочий газ 80% O₂ + 20% Ar, $j = 0.4 \text{ mA/cm}^2$, $U = 2000 \text{ V}$; *b* — 95% O₂ + 5% Ar, $j = 0.6 \text{ mA/cm}^2$, $U = 1400 \text{ V}$; *c* — 100% O₂, $j = 0.6 \text{ mA/cm}^2$, $U = 1400 \text{ V}$; *d* — 100% O₂, $j = 0.5 \text{ mA/cm}^2$, $U = 1000 \text{ V}$; *e* — 100% O₂, $j = 0.5 \text{ mA/cm}^2$, $U = 800 \text{ V}$).

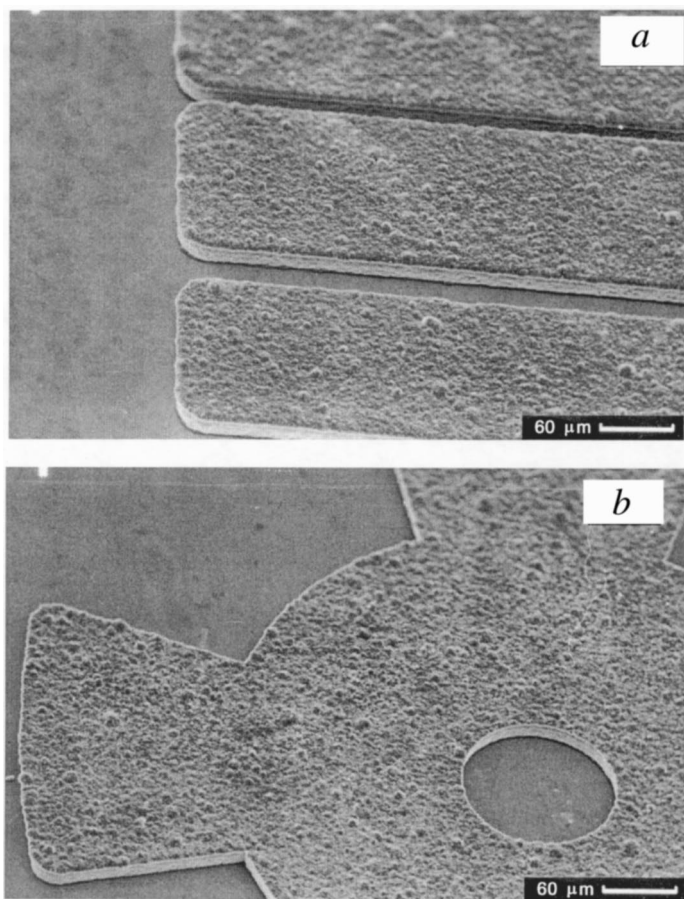


Рис. 2. Объемные детали микроэлектродвигателя продолговатой (*a*) и округлой (*b*) форм, полученные реактивным ионно-лучевым травлением кислородом ($j = 0.5 \text{ mA/cm}^2$, $U = 800 \text{ V}$).

удаляются при помощи меховой кисточки. Эти частицы плохо поддаются ионному распылению и не удаляются даже при травлении до поверхности кремния. Причиной их образования могут быть продукты распыления алюминиевой маски, которые попадают через окна в рисунке

маски на поверхность удаляемого полиимида. Известно, что алюминий и тем более оксид алюминия обладают более чем на порядок меньшими скоростями распыления по сравнению с полиимидом (в данном случае средняя скорость удаления полиимида составляла около $0.2 \mu\text{m}/\text{min}$) [3]. Поэтому продукты распыления маски будут накапливаться в процессе травления в окнах маски, экранируя участки полиимида от ионного пучка. Результаты травления полиимида толщиной до $30 \mu\text{m}$ со свободной от маски поверхностью, где образования округлых частиц не наблюдалось, свидетельствовали в пользу данной гипотезы. Основные этапы решения обеих отмеченных проблем показаны на последующих фотографиях (рис. 1). На рис. 1, *b* приведен профиль, полученный с использованием кислорода с 5%-ной добавкой аргона, $j = 0.6 \text{ mA}/\text{cm}^2$ и $U = 1400 \text{ V}$. Видно, что расслоение боковой поверхности полиимида сохраняется. Неоднородности на дне профиля приобретают вытянутую к поверхности форму, имеют меньшие поперечные размеры и занимают меньшую площадь по сравнению с рис. 1, *a*. На рис. 1, *c* показан профиль, полученный при использовании чистого кислорода, $j = 0.6 \text{ mA}/\text{cm}^2$ и $U = 1000 \text{ V}$. Видно, что расслоения у полиимида практически нет, но структура боковой стенки остается неоднородной по высоте. Неоднородности на дне становятся еще более вытянутыми, имеют еще меньшие поперечные размеры и занимают еще меньшую площадь, чем в предыдущих случаях. На рис. 1, *d* приведен профиль, полученный при использовании чистого кислорода, $j = 0.5 \text{ mA}/\text{cm}^2$ и $U = 1000 \text{ V}$. Боковые стенки являются отвесными, а дно — свободным от примесей. Однако структура полиимида возле поверхности несколько отличается от остальной его части. На рис. 1, *e* показан профиль с отвесными, однородными боковыми стенками и чистым дном. Волнистый рельеф дна устранялся в течение нескольких минут в последующем, после достижения слоя хрома. Параметры травления — рабочий газ кислород, $j = 0.5 \text{ mA}/\text{cm}^2$, $U = 800 \text{ V}$. Средняя скорость травления составила $0.26 \mu\text{m}/\text{min}$, а совокупная длительность стадий собственно травления и охлаждения — 100 min .

Таким образом, метод РИЛТ может успешно использоваться для формирования в полиимиде объемных элементов МЭМС. В подтверждение данного вывода на рис. 2, *a, b* приведены отдельные части микроэлектродвигателя. Для их получения наряду с РИЛТ применяли химическое травление и электролитическое осаждение никеля.

Список литературы

- [1] *Lochel B., Maciossek A., Konig M.* et al. // *Microelectronic Engineering*. 1994. V. 23. P. 455–459.
- [2] *Lochel B., Maciossek A., Quenzer H.J., Waqner B.* // *J. Electrochem. Soc.* 1996. V. 143 (1). P. 237–244.
- [3] *Plasma Processing for VLSI* / Ed. by N.G. Einspruch, D.M. Brown // *VLSI Electronics Macrostructure Science*. V. 8. New York: Academic Press, Inc., 1984.
- [4] *Стогний А.И., Токарев В.В.* // *ПТЭ*. 1990. № 3. С. 142–146.
- [5] *Kinoshita H.* // *Vacuum*. 1999. V. 55. P. 77–80.
- [6] *Амиров И.И.* *ЖТФ*. 2000. Т. 70. В. 5. С. 106–108.