



СОВРЕМЕННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА: НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ

Международная научно-практическая конференция

Минск, 23–24 апреля 2008 года

1

для мембран с Ni нагревателями); в последнее время распространены мембраны на основе ненапряженного поликремния с диэлектрической изоляцией нитрид Si.

Поликристаллический Si выполняет двойную роль: материал мембран и нагреватель датчика.

Применение поликремния в технике микромеханической обработки основано на следующем:

- поликремний имеет хорошие механические свойства, сопоставимые с монокремнием;
- технология обработки хорошо основана в микроэлектронной промышленности;
- поликремний устойчив к воздействию фтороводородной кислоты, что дает возможность использования двуокиси кремния в качестве жертвенного слоя.

В поликремневой поверхностной механической обработке двуокись кремния используется как жертвенный материал, так как он может быть легко растворен в присутствии поликремния. Реже двуокись кремния используется как хорошая маска при ионном травлении толстых поликремневых слоев.

Нитрид кремния – широко используется в интегральной промышленности для диэлектрической изоляции и поверхностного пассивирования.

Осаждение пленок ПКК, Si_3N_4 , SiO_2 происходит в горизонтальной кварцевой трубе при низком давлении и повышенной температуре.

В технологии мембран механические напряжения должны быть минимальными, что достигается технологическими режимами, обеспечивающими получение пленки ПКК, состоящей из смеси кристаллитов различной ориентации $\langle 111 \rangle$, $\langle 100 \rangle$, $\langle 130 \rangle$, обладающих механическими напряжениями разного знака, которые компенсируются. Структура пленок зависит от температуры осаждения, давления газа. Анализ зависимостей механических напряжений от температуры осаждения показывает, что ПКК с минимальными напряжениями можно получить используя систему пленок, осажденных при $T = 590^\circ\text{C}$ и $T = 615^\circ\text{C}$, имеющих напряжения противоположного знака, которые компенсируются.

Исходя из критерия минимальных механических напряжений анализ зависимостей параметров пленки Si_xN_y от соотношения газов и температуры осаждения, показал оптимальные режимы нанесения: общее давление – 30 Па; температура осаждения – 850°C ; соотношение газов – SiH_4/NH_3 как 5:1; скорость нанесения пленки 80 Å/мин; механическое напряжение 200 МПа. Выбрав оптимальные режимы нанесения можно получить пленки с механическими напряжениями в несколько раз меньше, чем у стехиометрического Si_3N_4 нитрида кремния.

В технологии датчика расхода газа окисные пленки используются в качестве защитной пленки, и для корректирования механических напряжений в мембране опасные пленки наносятся в реакторе низкого давления установки «Изотрон – 2».

Оптимальный режим нанесения пленки SiO_2 легированной фосфором (ФСС) методом LPSVD следующий: расход силана SiH_4 – 3,6 л/мин; расход кислорода O_2 – 4,5 л/мин; расход фосфорного ангидрида PH_3 – 0,3 л/мин общее давление – 40 Па; скорость нанесения – 15 нм/мин. При таких режимах значительно снижаются механические напряжения в пленке.

Механические напряжения в пленке ФСС достигают значений – 200 МПа усилие сжатия при толщине примерно 1 мкм. Такие механические напряжения позволяют наносить пленки ФСС толщиной примерно 1–10 мкм особенно при использовании их в качестве жертвенного слоя.

Основным методом измерения напряжений является метод изгиба пластин по изгибу интерференционных полос.

Формула расчета общего напряжения:

$$\sigma = \frac{E_y}{(1 - Y_s)} \cdot \frac{t_s^2}{6t_m R},$$

где E_y – модуль Юнга материала подложки (Si – 170 ГПа); Y_s – отношение сжатия Пуассона для материала подложки (Si_3N_4 – 270 ГПа); t_s – толщина подложки (~ 360 мкм); t_m – толщина пленки (~ 2 мкм); R – радиус изгиба подложки.

Корректировка механического напряжения осуществляется на основе определения изгиба балок на микроскопе МИИ-4. По величине и направлению изгиба определяется необходимость дополнительного нанесения слоя с положительным SiN_x (ПКК) или отрицательным знаком механических напряжений пленки SiO_2 ($d \sim 0,15\text{--}0,2$ мкм).

В технологии получения мембраны балок методами химического травления более широко используется анизотропное щелочное травление, которое имеет ряд преимуществ перед изотропным кислотным травлением. Скорости травления кремния ориентации (100) и (111) в данном травителе $\text{KOH} + \text{H}_2\text{O} + \text{пирокатехин}$ в режиме травления постоянны и равны соответственно 1 и 0,019 мкм/мин, т. е. наблюдается соотношение $v(100)/v(111) = 50:1$. Скорость травления SiO_2 составляет менее 10 нм/мин. Травитель имеет ряд преимуществ: простота обращения с раствором, неограниченный срок хранения, повторяемость результатов при травлении в течении длительного времени после его

приготовления.

Для получения более сложных конструкций – тонких мембран, мостиков, балок, консолей – необходимы комбинированные операции с обеих сторон кремния. При маскировании с одной стороны глубина канавки или углубления определяется продолжительностью жидкостного травления. Возможность управления процессом травления обеспечивает воспроизводимость в массовой технологии. С повышением концентрации бора в кремнии, начиная от $\sim 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ скорость травления резко убывает и при концентрации более $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ практически полностью останавливается. Этот эффект позволяет использовать стоп-слои при создании структур с очень тонкими мембранами (до 0,5 мкм).

Широкий спектр возможностей открывается при использовании метода электрохимического травления, позволяющий с высокой степенью точности контролировать скорость травления кремния, создавать жертвенные слои типа пористый кремний и хорошо вписываться в технологический маршрут изготовления датчиков.

Анализ методов и режимов травления мембран показывает, что наиболее оптимальным методом является создание мембраны, с помощью «жертвенного» слоя пористого кремния.

Литература

1. Schulena G. Marktchamen Sensoren // Sensormagazin. – 1995.
2. Johnson R. G., Egashi R. E. A highly sensitive silicon chip microtransducer for air flow and differential pressure sensing applications // Sensors and actuators A. – 1987.

А. А. Ясюнас, Д. А. Котов

Технологическая система для проведения глубокого плазмохимического травления

Тенденция развития технологии производства ИС, создание МЭМС (микроэлектромеханических систем) предъявляет высокие требования к глубине и скорости травления, высокой селективности, равномерности обработки и аспектному соотношению глубины и ширины (> 100) [1, 2]. Поэтому для проведения глубокого плазмохимического травления необходимо увеличение плотности плазмы до $(10^{11} - 10^{13}) \text{ см}^{-3}$ и повышения однородности до $\pm 3\%$ на подложках диаметром более 200 мм, увеличения мощности разряда до десятков киловатт, уменьшения давления до 1–100 мТорр [3].

Этим требованиям удовлетворяют безэлектродные СВЧ системы на основе электронного циклотронного резонанса (ЭЦР), ВЧ системы, использующие плазму «геликонового» разряда и индуктивно связанные (трансформаторные) разряды.

СВЧ системы дорогостоящи, имеют высокие требования по согласованию нагрузки и СВЧ источника, а также требуют больших значений внешних магнитных полей (1–2 кГс). Менее сложны устройства «геликонового» разряда, однако они также требуют наличия внешнего источника магнитного поля и цилиндрической формы разрядного реактора, что затрудняет равномерность обработки по большой площади. Поэтому наиболее просты, легко регулируются и широко применяются устройства с индуктивно-связанной плазмой [4].

Простейший вариант такого разряда можно реализовать в диэлектрической трубке, помещенной внутри соленоида, к которому подключено переменное напряжение рис. 1.

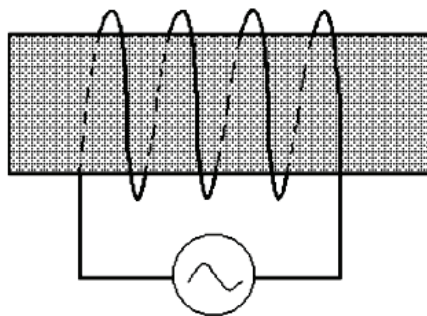


Рис. 1. Модель цилиндрического источника индуктивно-связанной плазмы

В трубке возникает индукционное азимутальное электрическое поле

$$E(r) = -\frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \sim hfB_m,$$

где B_m – амплитуда магнитной индукции, f – частота, h – толщина скин слоя, r – радиус трубы, Φ – магнитный поток через трубу, t – время.

Для достижения необходимого для протекания разряда поля $E \sim 10 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$ необходима мегагерцовая область частот [4].

Для цилиндрического индуцированного разряда характерны достаточно высокая концентрация ионов $n_i \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$, однородная до радиуса $\sim 10 \text{ см}$ дает широкую возможность высокопроизводительного технологического применения. Недостатком цилиндрического разряда является необходимость большого объема реактора (~ 30 литров для мишени диаметром 20 см), а следовательно, относительно большая общая мощность разряда, и сложность обеспечения равномерной концентрации плазмы.

Для равномерной обработки поверхностей большой площади используют плоские источники индуктивно-связанной плазмы со спиральным индуктором, что позволяет уменьшить длину реактора, следовательно, его объем и потребляемую мощность. Магнитное поле создается антенной системой, при подаче на нее напряжения высокой частоты, изменяющийся во времени магнитный поток создает вихревое электрическое поле, которое ускоряет свободные электроны в разрядной области. Ускоренные электроны ионизируют рабочий газ и обеспечивают поддержание разряда (см. рис. 2).

Вместе с тем конфигурация магнитного поля катушки усложняется, магнитное поле имеет две компоненты B_z и B_r . Равномерность распределения плазмы над индуктором и концентрация ионов в плазме, обеспечивается геометрией индуктора и частотой источника питания. Измерения распределения магнитного поля совместно с измерениями энергетического распределения ионов в плоском разряде для различных конфигураций индуктора проведены в работах [5, 6]. Показано, что при обработке пластин диаметром 200–300 мм, использование в плоском источнике спиральной антенны обычной конфигурации не обеспечивает необходимой мощности разрядной системы, из-за увеличения индуктивного сопротивления, в результате снижается плотность плазмы и возникает градиент концентрации ионов по поверхности источника. Для уменьшения сопротивления ВЧ антенны вместо одного индуктора используют несколько изготовленных в виде спиралей с общим центром.

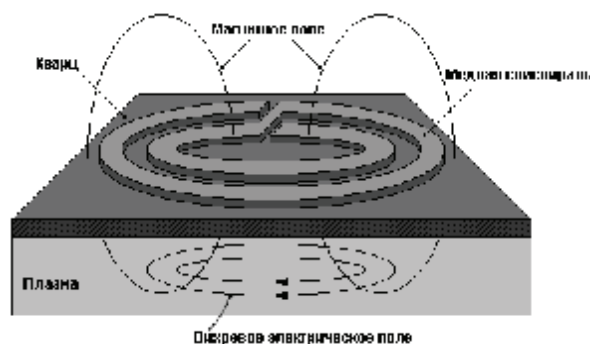


Рис. 2. Модель плоского источника индуктивно-связанной плазмы

Исходя из выше приведенного, на кафедре микро- и нанoeлектроники БГУИР проводится разработка плоского источника индуктивно-связанной плазмы с несколькими индукторами и диаметром рабочей зоны более 210 мм (см. рис. 3).



Рис. 3. Спираль реального источника индуктивно-связанной плазмы

Для изучения распределения концентрации плазмы в разрядной области проведено моделирование вихревого магнитного поля методом конечных элементов в программном пакете Elcut 5.1 Student,