УДК 621.382; 621.3.032

МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛЁНКАХ КАРБИДА КРЕМНИЯ И НИТРИДА АЛЮМИНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ МАГНЕТРОННЫМ МЕТОДОМ

Асташенкова О.Н., Корляков А.В.

Санкт-петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им.Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты определения внутренних механических напряжений в плёнках нитрида алюминия и карбида кремния, полученных методом магнетронного распыления. Показано влияние наведённого потенциала на подложке в процессе роста плёнок на их механические напряжения. Рассмотрены возможные механизмы формирования механических напряжений в плёнке в условиях возникновения наведённого потенциала. Показано, что внутренние механические напряжения в полупроводниковых плёнках сильно зависят от электродиффузии ионизированной примеси под действием градиента потенциала в плёнке.

ВВЕДЕНИЕ

В микросистемной технике значительное место занимают сенсорные и актюаторные устройства на основе тонкоплёночных элементов. Необходимость миниатюризации устройств, увеличение их чувствительности в различных условиях и диапазонах послужило основанием для проведения исследований в области управления механическими характеристиками устройств. Одним из возможных путей управления является управление характеристиками плёнки, на основе которой сформировано устройство, в процессе её формирования.

Возникновение неконтролируемых механических напряжений в слоях, входящих в состав микромеханических структур, может приводить к возникновению не воспроизводимых механических характеристик приборов, а также к непрогнозируемым термомеханическим изменениям. Управление уровнем механических напряжений в процессе формирования плёнки, а также при модификации готового устройства позволит не только минимизировать уровень механических напряжений в плёнках и создавать структуры с различными механическими напряжениями на одной подложке, а также структуры с управляемыми механическими характеристиками.

В настоящей работе исследовались механизмы формирования механических напряжений в полупроводниковых плёнках, полученных магнетронным методом, на примере нитрида алюминия и карбида кремния, которые используются в технологии поверхностной микромеханики [1].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

В настоящей работе исследовались механические напряжения в тонких плёнках полупроводников, полученных магнетронным методом. Экспериментальные образцы представляли собой тонкоплёночные микромеханические мембраны, состоящие из композиционных слоёв нитрид кремния/карбид кремния и нитрид кремния/нитрид алюминия. Слои карбида кремния были получены методом распыления мишени карбида кремния на подложку с изолирующем подслоем нитрида кремния. Мембраны формировались по технологии объемной микромеханики путём локального вытравливания кремниевой подложки до поверхности плёнки.

В зависимости от величины и знака механических напряжений мембраны формировались плоскими или деформированными, со сложными формами прогиба.

Для определения величин внутренних механических напряжений была использована методика, основанная на измерении прогиба тонкоплёночной мембраны в зависимости от подаваемого на неё статического давления. Расчет

© Асташенкова О.Н., Корляков А.В.

напряжений осуществлялся по следующему уравнению для прогиба плоской мембраны в диапазоне линейных деформаций [2]:

$$\sigma_0 = \frac{Pa^2}{c_1 hW},$$

где a – радиус круглой мембраны или половина стороны квадратной мембраны, W– прогиб центра мембраны, h - толщина мембраны, P - приложенное давление, σ_0 - механические напряжения мембраны, c_1 – коэффициент, зависящий от формы мембраны. Эта методика применялась для измерения однослойных и для композиционных структур.

Определение механических напряжений для деформированных мембран проводилось по трёхмерной модели деформированной мембраны (рис. 1), построенной при помощи оптического микроскопа Hirox KH-7700.

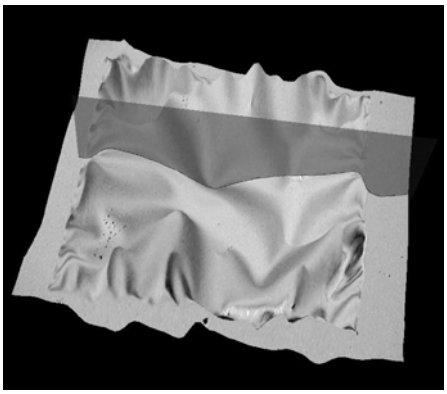


Рис. 1 3-D модель деформированной мембраны

Определение величины деформации плёнки проводилось по профилю поперечного сечения вдоль выбранной линии сканирования (рис. 2). Сканирование мембраны проводилось с заданным шагом по осям X и Y, которые соответствуют сторонам мембраны.

Механические напряжения определялись исходя из соотношения:

$$\sigma_0 = E \cdot \frac{\Delta L}{L} = \frac{E}{L} \cdot \left(\int_0^L \sqrt{1 - \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2}\, dx - L \right),$$

где: L-длина линии сканирования по оси X вдоль стороны мембраны; а ∂x и ∂y– изменения по осям X и Y; E – модуль Юнга материала мембраны.

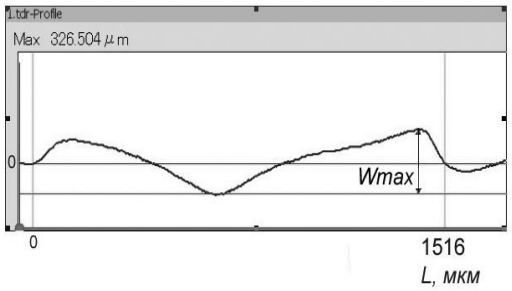


Рис. 2 Профиль поперечного сечения деформированной мембраны, где W_{max} – максимальный прогиб мембраны

Также исследование проводились на микромеханических балках на основе плёнок карбида кремния. Сформированы балки были по технологии поверхностной микромеханики с использованием жертвенных слоёв нитрида алюминия [3].

В качестве дополнительного проводящего слоя для создания электрического поля в плёнке карбида кремния при её формировании использовались слои ванадия, которые впоследствии удалялись.

Внутренние механические напряжения в балках, закреплённых с двух сторон, могут быть определены из величины прогиба центра балки при отсутствии внешней нагрузки. При условии больших прогибов, когда толщина плёнки много меньше прогиба центра балки, механические напряжения могут быть оценены приближённым выражением:

$$\sigma = 2{,}6 \frac{E}{l^2} y^2,$$

где: E – модуль Юнга материала балки; l – длина балки; y – величина прогиба балки под действием внутренних механических напряжений.

МЕХАНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ПЛЁНКАХ КАРБИДА КРЕМНИЯ

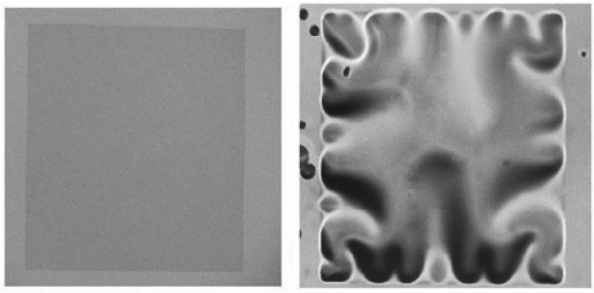
Особенностью формирования плёнки карбида кремния в процессе магнетронного распыления на кремниевую подложку с разделительным диэлектрическим слоем (нитрид кремния) является возникновение на подложке наведённого электрического потенциала, связанного с бомбардировкой подложки заряженными частицами.

В центре подложки плёнки карбида кремния формируются с минимальным уровнем механических напряжений (-200 МПа по результатам измерений и расчётов). На краю подложки, где наблюдается уменьшение величины наведённого электрического потенциала, уровень сжимающих напряжений в плёнках карбида кремния возрастает (-600 МПа).

Мембраны, сформированные на основе плёнок с минимальным уровнем механических напряжений формируются плоскими (рис. 3, а), а с высоким уровнем сжимающих напряжений - деформированными (рис. 3, б). Величина и форма прогиба зависят от величины механических напряжений.

Таким образом на одной подложке за счёт неравномерного распределения наведённого потенциала сформированы микромеханические мембраны с различной формой поверхности и различной величиной механических напряжений.

Для определения основных механизмов формирования механических напряжений в процессе магнетронного осаждения карбида кремния были разработаны специальные тестовые структуры, которые представляли собой балки, закреплённые с одного и с двух концов (рис. 4, а,б).

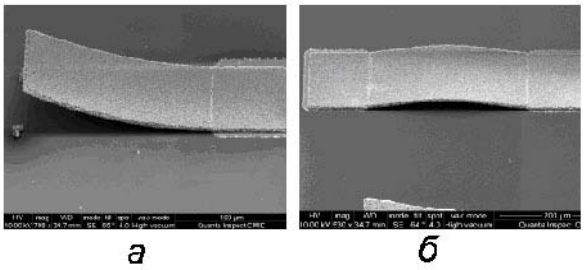


а б

Рис. 3 Формы прогиба микромеханических мембран на основе карбида кремния, а – с плоским рельефом, б - деформированные

По величине прогиба балок, закреплённых с двух концов, были определены механические напряжения плёнок карбида кремния.

Пленки карбида кремния, сформированные в условиях стока наведённого потенциала обладали высокими сжимающими механическими напряжениями около – 2700 МПа, тогда как для плёнок, полученных в электрически изолированной области, их величина составляла до –2000 МПа.



а б

Рис. 4 Микромеханические балки на основе карбида кремния, закреплённые на подложке с одного и двух концов

Прогиб балок, закреплённых с одного конца, свидетельствует о том, что присутствует градиент механических напряжений по толщине плёнки.

МЕХАНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ПЛЁНКАХ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ

В качестве материала для создания активных микромеханических мембран часто используются плёнки нитрида алюминия, которые позволяют управлять характеристиками мембраны за счёт использования пьезоэффекта [4].

Тем не менее управление характеристиками таких мембран можно осуществлять не только с помощью внешнего воздействия путем подачи на готовую мембрану электрического напряжения, но и в процессе получения слоя нитрида алюминия.

На уже вытравленные мембраны из нитрида кремния методом магнетронного нанесения были осаждены слои нитрида алюминия, толщиной 0,2 мкм. На подложке при получении плёнок нитрида алюминия, также как и при формировании слоев карбида кремния, возникает наведённый электрический потенциал [5], для управления которым с обратной стороны был осаждён дополнительный слой вольфрама, который после нанесения нитрида алюминия удалялся.

При формировании слоя нитрида алюминия слой вольфрама находился под потенциалом подложкодержателя.

При наличии проводящего слоя с обратной стороны мембраны формируется значительный

градиент потенциала в плёнке нитрида алюминия в процессе роста (рис. 5).

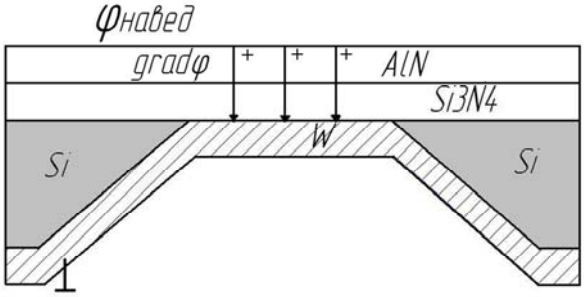


Рис. 5 Формирование электрического поля в плёнке полупроводника (нитрида алюминия) в процессе получения магнетронным методом

Величина механических напряжений в плёнках, полученных в условиях возникновения значительного градиента потенциала, составляла на прядок выше (– 150 ГПа) величины механических напряжений в плёнках, полученных без градиента потенциала (без слоя W), которая составляла только –17 ГПа.

В плёнках нитрида алюминия, как и в плёнках карбида кремния, величина внутренних механических напряжений находится в сильной зависимости от градиента электрического потенциала в плёнке в процессе её формирования.

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛЁНКАХ КАРБИДА КРЕМНИЯ И НИТРИДА АЛЮМИНИЯ

Влияние на формирование механических напряжений в процессе магнетронного осаждения могут оказывать различные твёрдофазные процессы. Нами показано, что наибольшее влияние оказывают примеси, которые входят в плёнку в процессе её формирования.

Был выполнен рентгеноспектральный микроанализ полученных структур, который показал, что основной примесью в плёнках нитрида алюминия и карбида кремния, является кислород.

При этом на мембранах до напыления слоёв нитрида алюминия и карбида кремния кислород не детектируется.

Экспериментальная проверка влияния добавки кислорода в рабочую камеру в процессе формирования плёнок показала значительное увеличение сжимающих внутренних механических напряжений (с – 200 МПа до –600 МПа и более).

Градиент механических напряжений по толщине в плёнках карбида кремния может быть связан с электромиграцией примеси по толщине плёнки и накоплением её вблизи подложки.

Электрическое поле в плёнке, которое возникает из-за наведённого потенциала в процессе магнетронного распыления, приводит к электромиграции примеси к подложке и как следствие – формированию высоких сжимающих механических напряжений.

ВЫВОДЫ

В результате исследования механизмов формирования механических напряжений в тонких плёнках полупроводников было определено, что основное влияние оказывает распределение наведённого потенциала в плёнке.

Были проведены эксперименты для плёнок нитрида алюминия и карбида кремния.

Было выявлено:

- Механические напряжения в плёнках карбида кремния и нитрида алюминия, полученных магнетронным методом, являются сжимающими и их величина зависит от условий формирования плёнки
- Создание дополнительных проводящих слоёв позволяет управлять распределением наведённого потенциала на подложке и регулировать распределение механических напряжений в плёнках карбида кремния и нитрида алюминия
- Заметное влияние наведённого потенциала на формирование внутренних механических напряжений может быть объяснено электромиграцией примеси к поверхности подложки под действием градиента электрического потенциала в плёнке и накоплением примеси вблизи поверхности подложки или разделительного диэлектрического слоя.

Управление величиной механических напряжений в тонких плёнках полупроводников может осуществляться в процессе их формирования за счёт управления градиентом электрического потенциала в плёнке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Korlyakov A.V., Luchinin V.V., Mal'tsev P.P. (1999) "SIC-ALN-based microelectromechanical structures" Russian microelectronics, - Vol.28, no.3, - pp. 168-177
2. Асташенкова О.Н., Корляков А.В. Контроль физико-механических параметров тонких плёнок, Нано- и микросистемная техника, №2, 2013 − с. 24-29

   Astashenkova, O.N. and Korlyakov, A.V. (2013) "The Physical and Mechanical Parameters Control of Thin Films" Journal of NANO and MICROSYSTEM TECHNIQUE, no.2, pp.24-29
3. Бохов О.С., Духновский М.П., Козырев А.Б., Корляков А.В., Королев А.Н., Лагош А.В., Лучинин В.В., Топталов С.И. Низкопотребляющие малогабаритные радиотехнические модули на основе микроэлектромеханических ключей/ Нано- и микросистемная техника, 2012, №12, с. 60-71
4. Ефременко А.М., Корляков А.В., Кривошеева А.Н., Лучинин В.В. Получение текстурированных слоев нитрида алюминия для микромеханических актюаторов / Вакуумная техника и технология. - Т. 17, № 3, 2007. - с.189 - 198.

   Efremenko, A.M., Korlyakov, A.V., Krivosheeva, A.N., Luchinin V.V. (2007) "Deposition of grain-oriented aluminum nitride layers for micromechanical actuator", Vacuum equipment and technology, vol.17, no.3, pp.189-198
5. Ефременко А.М., Корляков А.В, Асташенкова О.Н, Кривошеева А.Н. Низкотемпературный синтез текстурированных плёнок нитрида алюминия на инородных подложках для устройств микросистемной техники/ Нано- и микросистемная техника, №12, 2012. − с. 25-30

   Efremenko, A.M., Korlyakov, A.V., Astashenkova, O.N., Krivosheeva, A.N. (2012) "Low-Temperature Synthesis of Aluminium Nitride Textured Films on Heterogeneous Waters for MEMS Devices", Journal of NANO and MICROSYSTEM TECHNIQUE , №12, pp.25-30

© Асташенкова О.Н., Корляков А.В.