



# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕМБРАН ДЛЯ МЭМС-СТРУКТУР

## RESEARCHING MECHANICAL PROPERTIES OF MULTILAYER MEMBRANE FOR MEMS STRUCTURES

УДК 531.78

**ДЮЖЕВ НИКОЛАЙ АЛЕКСЕЕВИЧ**  
djuzhev@unicm.ru

**DJUZHEV NIKOLAY A.**  
djuzhev@unicm.ru

**НОВИКОВ ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**  
novikov@unicm.ru

**NOVIKOV DMITRI V.**  
novikov@unicm.ru

**ГУСЕВ ЕВГЕНИЙ ЭДУАРДОВИЧ**  
bubbledouble@mail.ru

**GUSEV EVGENEY E.**  
bubbledouble@mail.ru

НТЦ «НМСТ» МИЭТ

“NMST” STC MIET

Разработана методика измерения механических напряжений по изгибу пластины. Измерены механические напряжения, возникающие в процессе изготовления мембраны  $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ , используемой в МЭМС-структурах. Выполнена оптимизация технологического маршрута формирования мембраны для тепловых датчиков.

*Ключевые слова:* механические напряжения; профилометр; МЭМС.

The paper deals with development method for measuring mechanical stresses on bending substrate. Mechanical stresses occurring in manufacturing process of membrane  $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ , used in MEMS structures have been measured. An improvement is made to process flow of forming a membrane for thermal sensors.

*Keywords:* mechanical stresses; profilometer; MEMS.

### ВВЕДЕНИЕ

Диэлектрические мембраны находят широкое применение в МЭМС-структурах в качестве функционального элемента. Например, в тепловых датчиках это терморезисторы и нагреватель [1]. Главное требование: структура, обладая минимальной толщиной, должна обеспечивать требуемую механическую прочность. При этом величина стрелы прогиба должна быть минимальной для повышения площади контактирования маски и образца при процессе фотолитографии. Также после отделения от подложки

находиться в натянутом положении, т.е. в мембране обязаны присутствовать положительные механические напряжения. Поэтому важно не только контролировать величину стресса в процессе формирования структуры, но и управлять ей. С этой целью проводятся исследования по определению влияния технологических параметров процесса (давление в камере, соотношение расхода газов, толщина пленки) на величину механических напряжений [2, 3]. Напряжение в пленках структуры, как правило, может приводить к растрескиванию, гофрированию или отслаиванию слоев [4].

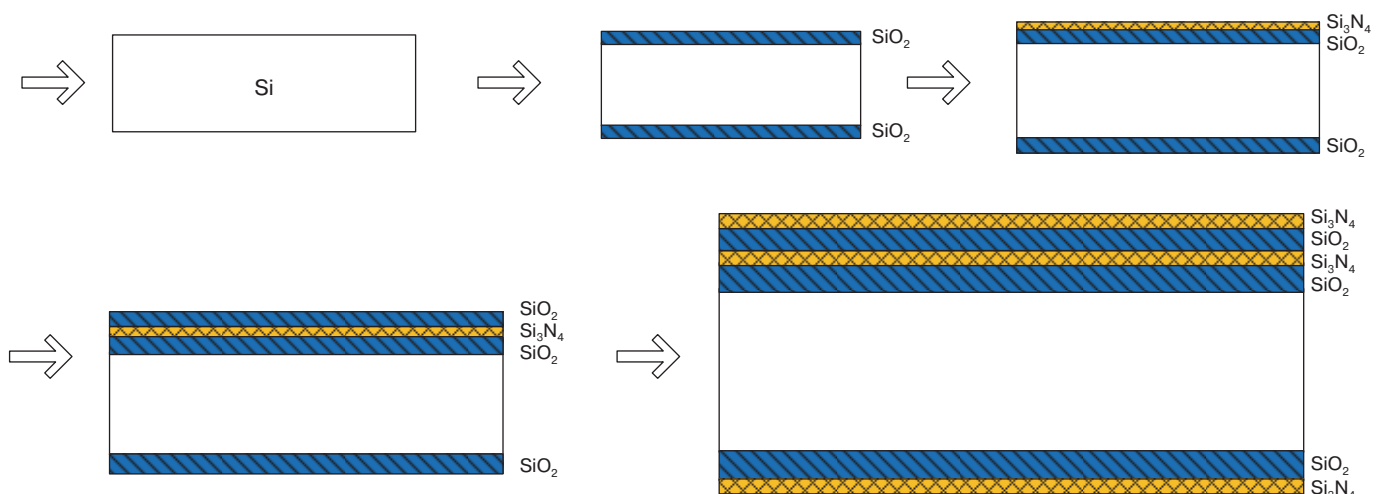


Рис. 1. Технологический маршрут



### ЭКСПЕРИМЕНТ

На утоненной пластине монокристаллического кремния толщиной 460 мкм с кристаллографической ориентацией (100) был выращен термический оксид кремния толщиной 0,6 мкм. Далее методом PECVD осажден слой нитрида кремния толщиной 0,13 мкм. После этого проведено плазмохимическое осаждение  $\text{SiO}_2$  толщиной 0,4 мкм. Далее сделана термообработка образца в сухом кислороде при температуре 950 °С в течение 30 мин. Финальной технологической операцией перед осаждением чувствительного элемента из Pt было осаждение 0,13 мкм высокотемпературного  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Технологический маршрут представлен на рис. 1.

Проведено измерение рельефа поверхности исследуемого образца с помощью бесконтактного оптического профилометра. Разработана методика измерения механических напряжений, которая включает в себя программу для вычисления величины кривизны поверхности [5]. Новизна предложенного неразрушающего метода измерения механических напряжений.

Шаг измерения между соседними точками поверхности варьируется в зависимости от используемого объектива. Минимальная величина шага составляет 0,28 мкм. Площадь кристалла составляет не менее 1 мм<sup>2</sup>. Таким образом, обеспечивается наглядное представление данных по поверхности каждого кристалла пластины. Результаты измерений и расчетов в направлении перпендикулярно базовому срезу представлены на рис. 2 и 3.

Из рис. 2 можно заключить, что проведение отжига изменило знак величины стрелы прогиба. После операции осаждения высокотемпературного нитрида кремния рельеф поверхности остался неизменным.

Из рис. 3 видно, что в четырехслойной мембране величина кривизны поверхности не изменилась после осаждения верхнего нитрида кремния. Далее сделан расчет механических напряжений в исследуемом образце по методу Стони (1), в котором механические напряжения рассчитываются по изгибу пластины из величины изменения радиуса кривизны локализованной части поверхности пластины:

$$\sigma_f = \frac{E \cdot d_s^2}{6 \cdot (1 - \mu) \cdot d_{\text{film}} \cdot R_{\text{film}}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_f$  — величина механических напряжений,  $E$  — модуль Юнга материала подложки,  $d_s$  — толщина пластины,  $\mu$  — коэффициент Пуассона подложки,  $d_{\text{film}}$  — сумма толщин слоев на подложке,  $R_{\text{film}}$  — радиус кривизны поверхности после проведения технологической операции.

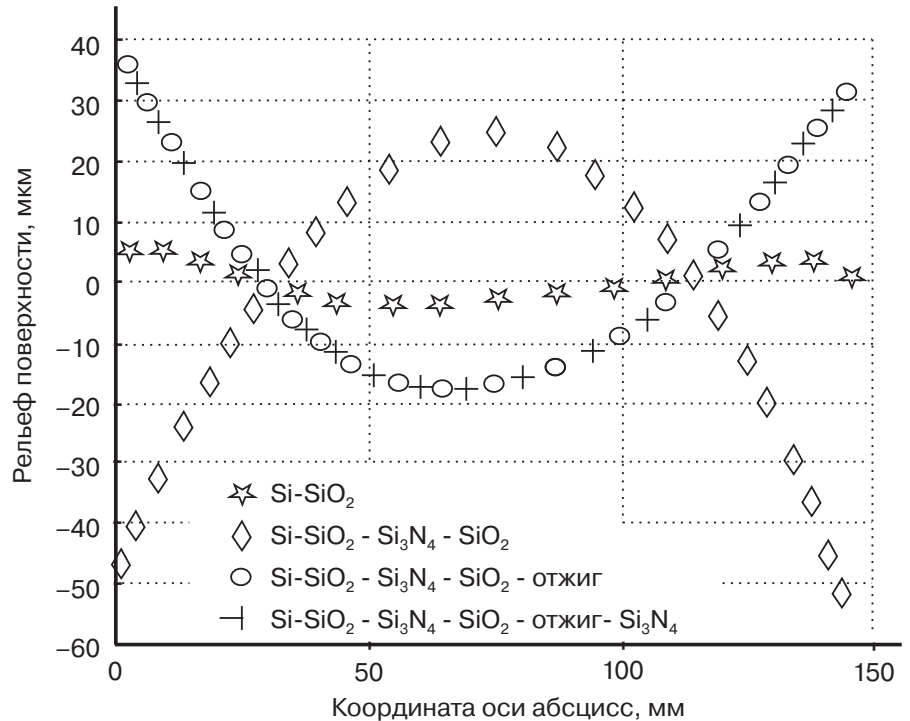


Рис. 2. Измерение рельефа поверхности исследуемого образца

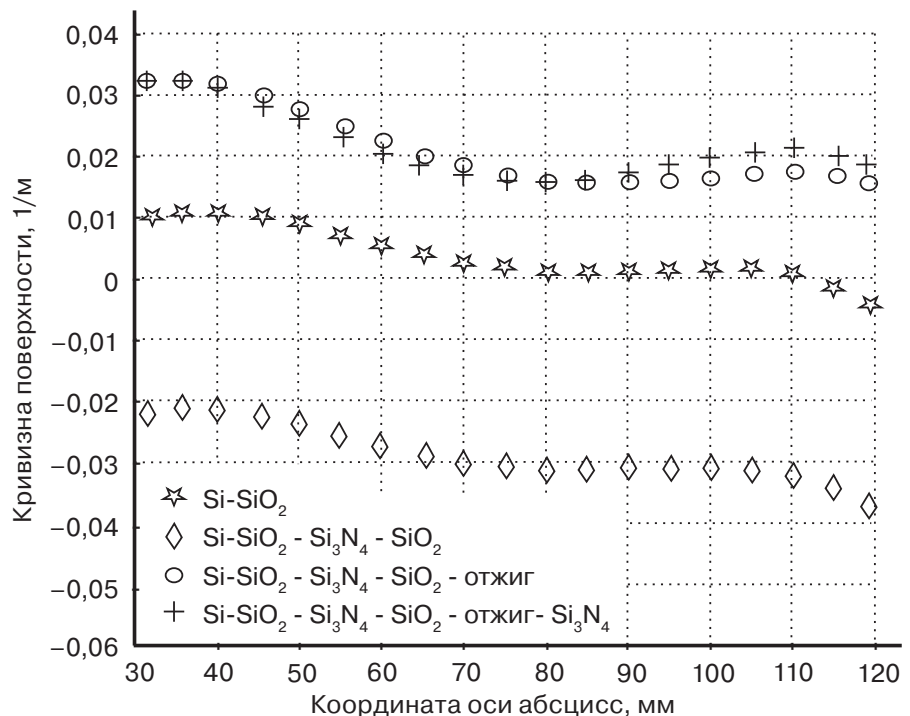


Рис. 3. Расчет кривизны поверхности исследуемого образца

На рис. 4 представлен расчет механических напряжений, где постоянная двухосного модуля ( $E/(1 - \mu)$ ) в кристаллографической плоскости образца (100) составляет 180,5 ГПа [4].

Из рис. 4 можно заключить, что в четырехслойной мембране присутствуют незначительные положительные механические напряжения. Следовательно, уменьшается вероятность гофрирования поверхности. Значит, после плазмохимического травления

пластины с обратной стороны структура будет «слегка натянутой», что позволит повысить прецизионность измерений.

**ВЫВОДЫ**

Разработана методика измерения механических напряжений по изгибу пластины в локальной области. Проведены измерения механические напряжений, возникающие в процессе изготовления мембраны SiO<sub>2</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, используемой в МЭМС-структурах. Оптимизирован технологический маршрут формирования мембраны для тепловых датчиков в целях формирования требуемых механических напряжений внутри мембраны для предотвращения растрескивания, гофрирования или отслаивания слоев.

*Работа выполнена на оборудовании ЦКП «МСТ и ЭКБ» при поддержке Минобрнауки РФ  
соглашение № 14.578.21.0001 (RFMEFI57814X0001)*

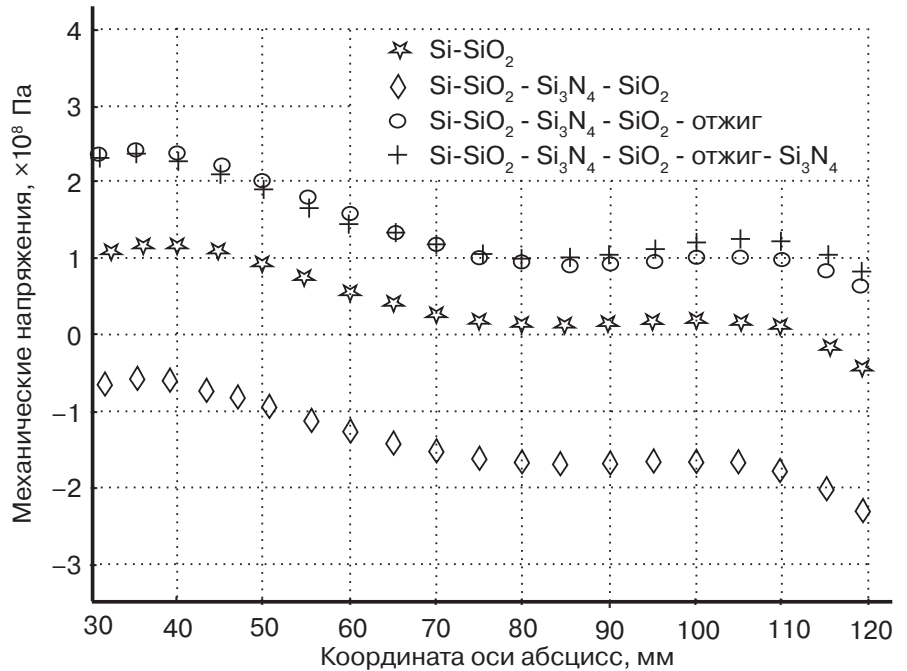


Рис. 4. Расчет механических напряжений исследуемого образца

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Дюжев Н.А., Королёв М.А., Катеев М.В., Гусев Е.Э. Моделирование зависимости выходных характеристик первичного преобразователя датчика потока мембранного типа от его конструктивных параметров // Известия вузов. Электроника. — 2015. — № 6. — С. 644–647.
2. Рубцевич И.И., Соловьев Я.А., Высоцкий В.Б., Дудкин А.И., Ковальчук Н.С. Исследование свойств пленок нитрида и оксида кремния, полученных методом плазмохимического осаждения на кремниевую подложку // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2011. — № 4. — С. 29–32.
3. Dotinguez C., Rodriguez J.A., Munoz F.J., Zine N. The effect of rapid thermal annealing on properties of plasma enhanced CVD silicon oxide films // Thin Solid Films. — Vol. 346. — 1999. — P. 202–206.
4. Sinha A. K., Levinstein H.J., Smith T. E. Thermal stresses and cracking resistance of dielectric films (SiN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and SiO<sub>2</sub>) on Si substrates // Journal of Applied Physics. — 1978. — Vol. 49. — P. 2423.
5. Дюжев Н.А., Гусев Е.Э., Дедкова А.А., Чиненков М.Ю. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611518. Программа анализа рельефа с целью расчета величины кривизны поверхности в выбранном направлении на кремниевой пластине. Действует с 04.02.2016.

**КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"**



**ДАТЧИКИ**

Шарапов В.М., Полищук Е.С., Кошевой Н.Д., Ишанин Г.Г., Минаев И.Г., Совлуков А.С.

Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука

В книге изложены теоретические основы, принципы действия, описаны конструкции и характеристики датчиков физических величин. Сборник написан коллективом авторов и состоит из 24 глав. В конце каждой главы приведена обширная библиография, а также сайты предприятий – разработчиков и изготовителей.

Книга предназначена для научных работников, студентов, аспирантов, специалистов в области разработки датчиков, измерительных приборов, элементов и устройств вычислительной техники и систем управления.

М: ТЕХНОСФЕРА, 2012. – 624 с.  
ISBN 978-5-94836-316-5

Цена 840 руб.

**КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?**

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ (495) 234-0110; 📠 (495) 956-3346; ✉ knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru