

## ИЗМЕРЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ФРАГМЕНТЕ ПЛЕНКИ НИТРИДА КРЕМНИЯ

А.А. Дедкова, Н.А. Дюжев, Е.Э. Гусев,  
М.А. Махиборода, Н.Н. Патюков

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*

*bubbledouble@mail.ru*

Поступила 29.10.17

Разработан способ определения механических напряжений, основанный на анализе изменения геометрии фрагмента плёнки после освобождения от подложки. Проведено моделирование технологического маршрута формирования балочной структуры в среде TCAD. Исследована зависимость прогиба структуры под действием силы тяжести с помощью программы SolidWorks. Экспериментальная подготовка структур осуществлялась с использованием фокусированного ионного пучка. В качестве установки для измерения линейных размеров применялся растровый электронный микроскоп. Проведены измерения механических напряжений нитрида кремния разработанным способом, которые составили - 1.64 ГПа, относительная погрешность составила 1.2 %. Полученное численное значение механических напряжений хорошо коррелируют с данными, получаемыми другими методиками. Данный способ может использоваться для различных материалов, используемых в МЭМС технологии.

УДК 531.78

### **Введение**

Разработка технологии процесса получения микроэлектромеханических систем (МЭМС) динамично развивается в настоящее время. Способствует этому ключевые преимущества МЭМС: миниатюрность, функциональность, надёжность, малое энергопотребление, простота интегрирования. Области применений МЭМС представлены от самых массовых рынков – автомобильного (датчики давления [1,2,3] в шинах, акселе-

влажности окружающей среды [7,8,9], микрофоны[10,11]) до рынков сложных приборов специального назначения, производимых небольшими партиями: медицинских приборов (микроиглы [12] и датчики давления [13,14] для анализа крови, импланты [15,16], микронаносы для подачи микродоз лекарства человеку [17,18]), военной (рентгеновские источники [19,20,21] для анализа взрывчатых веществ [22], обнаружение подземных и подводных угроз посредством миниатюрных магнитных датчиков [23]) и аэрокосмической техники (беспилотные системы [24], акселерометры для исследования динамики перемещения в воздухе с целью повышения аэродинамических характеристик[25]).

За последние 10 лет объём рынка компонентной базы вырос на 35% с 259 млрд.\$ в 2006 году [26] до 352 млрд.\$ в 2016 году [27,28]. Анализ рынка, проведенный компанией Yole deloverment в 13ый раз, показывает, что рынок будет иметь положительную тенденцию к росту как фирм-флагманов, таких как Robert Bosch, так и компаний, которые недавно вышли на рынок, например MEMSIK. В ближайшие несколько лет для потребителей наибольшее увеличение интереса ожидается к газовым сенсорам. Будет наблюдаться снижение интереса к технологии производства пластин диаметром 300 мм [28].

Ключевую роль в МЭМС устройстве играет мембрана, которая состоит из одного или нескольких слоёв. Каждый слой обладает своими механическими свойствами. Производительность МЭМС сильно зависит от механических свойств используемых материалов. Оценка механических свойств материалов незаменима для проектирования МЭМС-устройств. Точные значения механических свойств (свойства упругости, внутренние напряжения, прочность, усталость) необходимы для получения оптимальных характеристик. Например, упругие свойства необходимы для прогнозирования величины отклонения от приложенной силы, а прочность материала задает эксплуатационные пределы устройства. Кроме того, с учетом требований надежности и срока службы механическая характеристика МЭМС материалов становится все более важной. Небольшие размеры МЭМС-устройств часто приводят к их использованию в суровых условиях, и хорошее знание механических свойств может привести к устранению некоторых механических неисправностей посредством надлежащего выбора материала, проектирования, изготовления и корпусирования. Поскольку интерес к МЭМС растет, спрос на соответствующие данные увеличивается. Надежность, точность и воспроизводимость методов оценки являются проблемой. В МЭМС используются такие материалы, как кремний и многие другие тонкие пленки, которые не полностью характеризуются их механическими свойствами, поскольку ранее они не считались механическими материалами. До сих пор свойства тонких пленок были оценены в основном для удовлетворения потребностей в исследованиях полупроводниковых приборов. Но оценки были в основном сосредоточены на электрических свойствах, в то время как исследования механических свойств ограничивались главным образом внутренними напряжениями. По этой причине объёмные свойства использовались в расчёте всякий раз, когда требовались свойства плёнок. Но с растущим применением тонких пленок в различных механических структурах возрастала потребность в лучшем понимании их механических и электромеханических свойств. Поэтому необходимо точно контролировать механические свойства тонких пленок, используемых в МЭМС. Их следует измерять в том же масштабе, что и микро- и наноустройства, поскольку они отличаются от свойств объёмных

ёмного материала. Тонкопленочные и объёмные материалы обычно имеют разные составы, фазу и микроструктуру. Необходимо учитывать процесс формирования тонких пленок (осаждение, термическая обработка, имплантация и окисление). Механическая обработка как метод обработки большинства объемных структур осуществляется в случае тонких пленок посредством фотолитографии и травления. Также, объемная и тонкая пленки имеют разную поверхностную обработку сформированной топологии материала. Когда речь идет о размерном эффекте, нужно иметь в виду, что отношение площади поверхности к объему возрастает по мере уменьшения размеров устройства. Размеры структур в устройствах МЭМС варьируются от субмикронметров до миллиметров, и поэтому размерный эффект в тонких пленках более значителен, чем в объемных материалах. Было разработано много методов измерения оценки механических свойств тонких пленок и были получены различные значения [29,30,31]. Разброс значений в измеренных величинах был большим, требующий обширных исследований для оценки повторяемости, точности и надежности данных различных методов измерения механических свойств материалов МЭМС. Поэтому разработка международных стандартов по материалам МЭМС и методам измерения их свойств является одной из основных задач при использовании технологии МЭМС[32].

Существующие методики определения механических напряжений основаны на деформации пластины (профилометрия [33]), или связаны с измерением параметров решетки (рентгеновская дифрактометрия, просвечивающая электронная микроскопия). В данной работе предложен метод определения механических напряжений в плёнках для различных материалов, основанный на анализе изменения геометрии фрагмента плёнки после освобождения от подложки. Алгоритм определения механических напряжений в МЭМС структурах с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) включает в себя разработку макета, подготовку структур, измерение линейных размеров фрагмента плёнки до и после удаления подложки и расчет напряжений по закону Гука.

Макет и контролируемые параметры представлены на рисунке 1.

Проведен подбор длины исходной балки  $L_0$  таким образом, чтобы разрешение установки для измерения линейных размеров (в данных исследованиях РЭМ FEI Quanta 3D FEG) было достаточным для определения изменения размеров исследуемой структуры (зазора между балкой и областью периферии  $d_0$ , длины балки  $L_0$ ) после проведенных технологических операций.

Из работы [34] среднее напряжение (сжимающее) в плёнке  $\text{Si}_3\text{N}_4$  полученной методом PECVD, определённое с помощью профилометра методом по изгибу пластины, составляет -1.25 ГПа. Постоянная двухосного модуля  $E_f/(1-\mu_f)$  плёнки нитрида кремния используемая в расчётах составляет  $1.9 \cdot 10^{11}$  (Па) [35].

В процессе технологического маршрута после удаления подслоя, часть плёнки освобождается, и структура в зависимости от знака механических напряжений будет сжиматься или растягиваться [36]. Следовательно, зазор между периферией и краем балки должен измениться. Формула (1) [37] используется для расчёта механических напряжений:

$$\sigma = -\frac{L-L_0}{L} \cdot \frac{E_f}{1-\mu_f} \quad (1)$$

где  $L$  – длина свободного конца балки после удлинения/сжатия,  $L_0$  – длина исходной балки,  $-(L - L_0)/L$  – деформация  $\varepsilon$ ,  $\mu_f$  – коэффициент Пуассона плёнки,  $E_f$  – модуль Юнга плёнки.

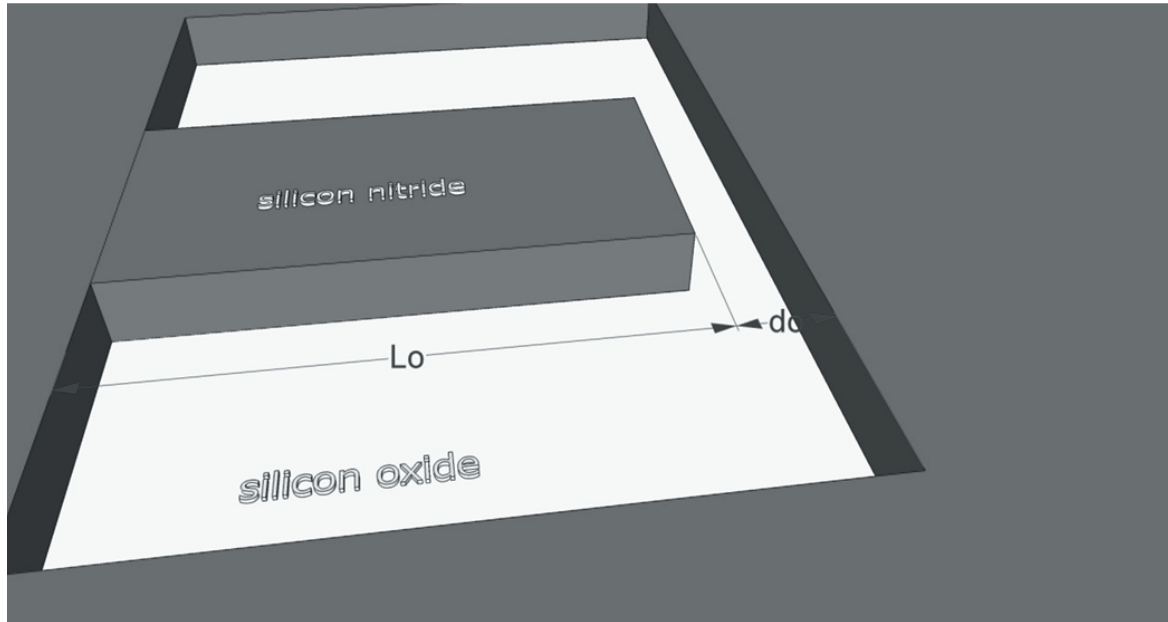


Рис. 1. Макет балочной структуры

Из формулы (1) выражена переменная  $L_0$ . Рассчитана минимальная начальная длина балки исходя из ограничений двухлучевой системы FEI Quanta 3D FEG. Исходная длина балки должна составлять более 10 мкм. В данной работе выбрана исходная длина балки 69.5 мкм. В соответствии с формулой (1) величина удлинения составит около 460 нм. Изменение зазора между балкой и периферией будет легко идентифицировать с помощью РЭМ.

Далее проведена оценка точности измерения механических напряжений. Рассмотрим механические напряжения  $\sigma$  как функцию двух переменных. Известно [38], что абсолютная погрешность измеряемой величины при косвенных измерениях (т.е. в случае, при котором значение физической величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, найденными в результате прямых измерений) определяется как квадратный корень из суммы квадратов произведений частных производных этой величины по каждой из прямо измеряемых величин, помноженных на абсолютную погрешность этой прямо измеряемой величины. Таким образом, абсолютная погрешность определения механических напряжений составляет:

$$\Delta\sigma(L, L_0) = \sqrt{\left(\left\{\left(-\frac{L - L_0}{L}\right) \cdot \frac{E_f}{1 - \mu_f}\right\}'_{L_0} \cdot \Delta L_0\right)^2 + \left(\left\{\left(-\frac{L - L_0}{L}\right) \cdot \frac{E_f}{1 - \mu_f}\right\}'_L \cdot \Delta L\right)^2} \quad (2)$$

$$\Delta\sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{L} \cdot \Delta L_0\right)^2 + \left(-\frac{L_0}{L^2} \cdot \Delta L\right)^2} \cdot \frac{E_f}{1 - \mu_f} \quad (3)$$

Учитывая, что  $\Delta L \approx \Delta L_0$ , то получим :

$$\Delta\sigma = \sqrt{2} \frac{\Delta L}{L} \cdot \frac{E_f}{1 - \mu_f} \quad (4)$$

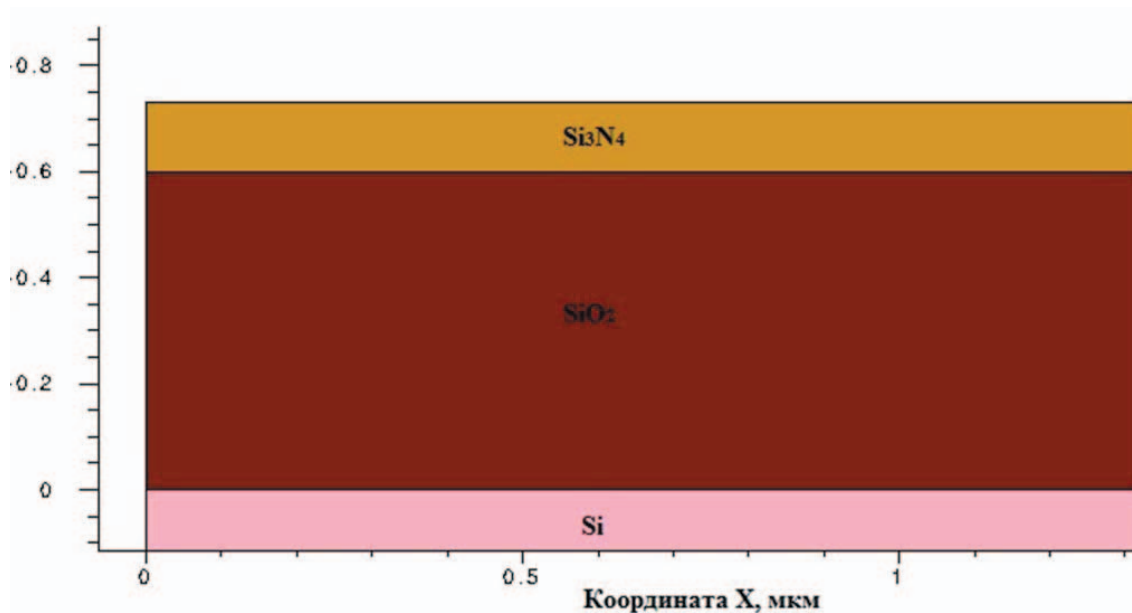


Рис. 2. Осажденные диэлектрические плёнки на Si подложке

Формула (4) получена с учётом того, что  $\Delta L \approx \Delta L_0$ ,  $L \approx L_0$ ,  $L_0, \sqrt{\frac{L_0^2 + L_1^2}{L_0^2}} \approx \sqrt{2}$ .

Для улучшения прецизионности измерений контроль линейных размеров осуществляется посредством измерения зазора между периферией и краем балки исследуемого материала. Изображение, анализируемое исследователем в РЭМ, представляет собой матрицу 1000×1000 пкс. Обычно погрешность составляет 1 пкс. Таким образом, при величине зазора 5 мкм, погрешность  $\Delta L$  составит 5 нм.

Исходя из расчетов, относительная погрешность измерения напряжений по данной методике при  $(L - L_0) \sim 0,5$  мкм составляет не более 1,5 %.

### Численное моделирование в среде TCAD.

Проведено моделирование технологического маршрута формирования балочной структуры в среде приборно-технологического моделирования TCAD. На кремниевую подложку осажден слой оксида кремния толщиной 0,6 мкм и слой нитрида кремния толщиной 0,13 мкм, что показано на рис. 2.

Следующим шагом проведена фотолитография с линейным размером области окна 5 мкм. Затем протравлен нитрид кремния до оксида кремния в областях незащищенных резистом (рис. 3)

После этого, изотропно удаляют оксид кремния на толщину 0,9 мкм (рис.4).

Из рисунка выше видно, что сформированы балочные структуры из  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Затем анизотропно удаляют кремний (рис.5).

Заметно, что смоделированная структура включает в себя вертикальные стенки из кремния, а также балочную структуру из нитрида кремния на подслое оксида кремния.

### Численное моделирование в среде SolidWorks.

Исследовалась характеристика балочной структуры в среде SolidWorks. Геометрия балочной структуры: длина 69,5 мкм, ширина 45 мкм, толщина 0,13 мкм. Под действием силы тяжести балка прогибается, причем левая боковая грань закреплена (рис. 6).

Зависимость деформации структуры от внешней силы ( $1 \text{ м} \times g$ ) показана ниже.

Заметно, что максимальное смещение не превышает 1,7 мкм.

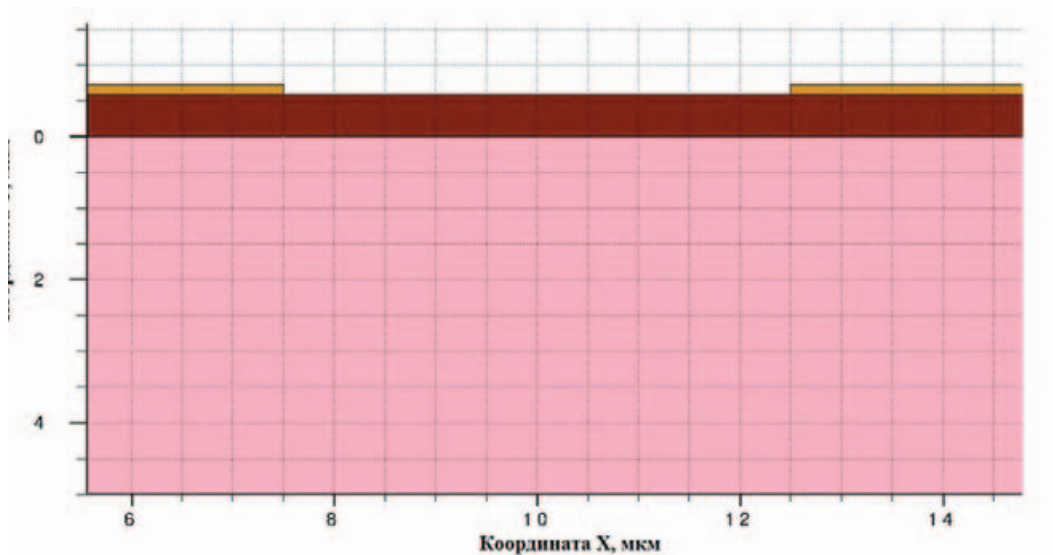


Рис. 3. Формирование рисунка в нитриде кремния

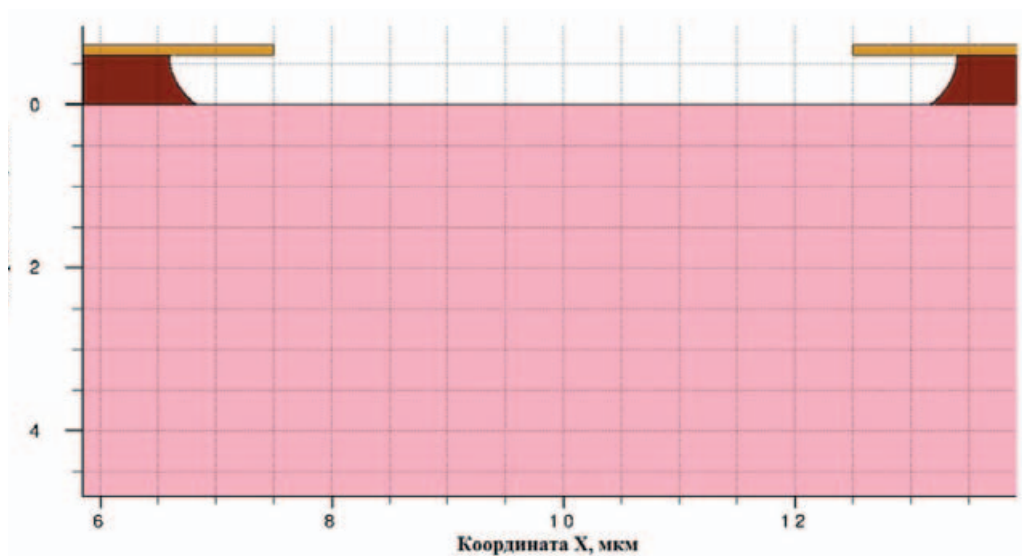


Рис.4. После изотропного травления оксида кремния

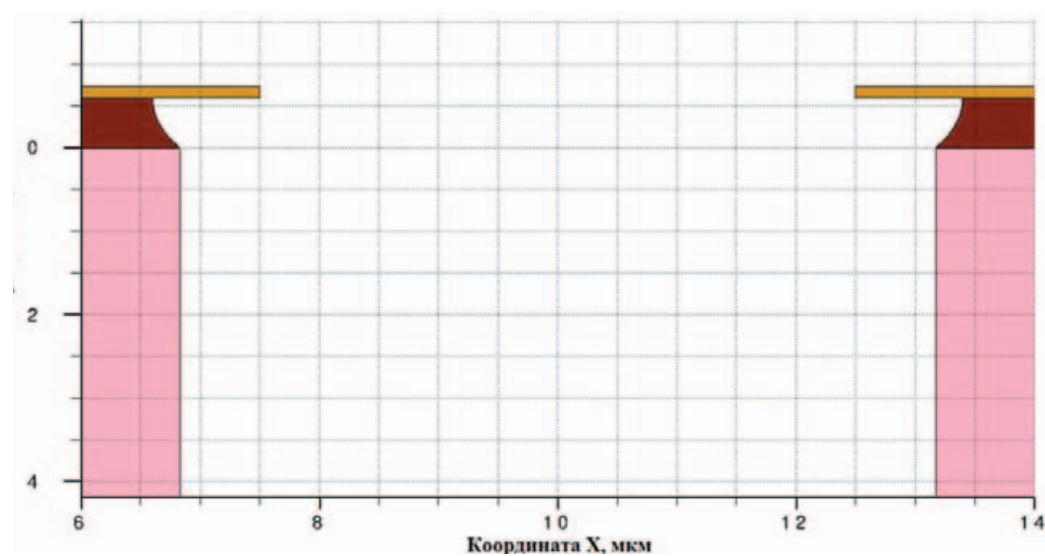


Рис. 5. Вид структуры после вертикального анизотропного травления кремния

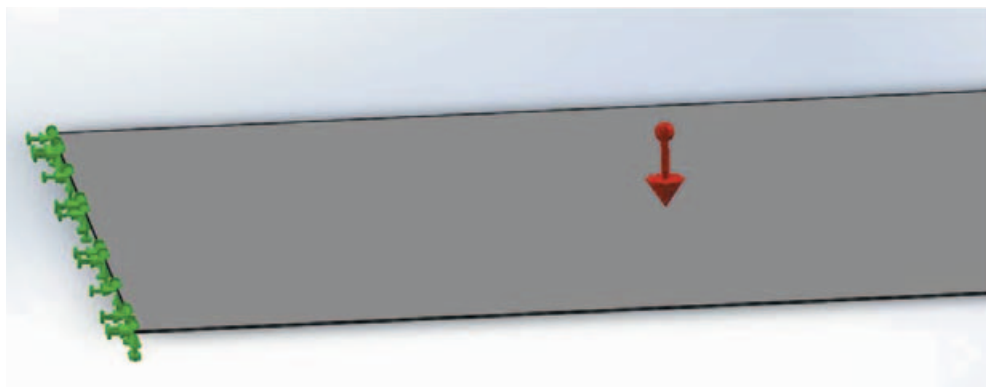


Рис. 6. Крепление конструкции и направление действия силы тяжести

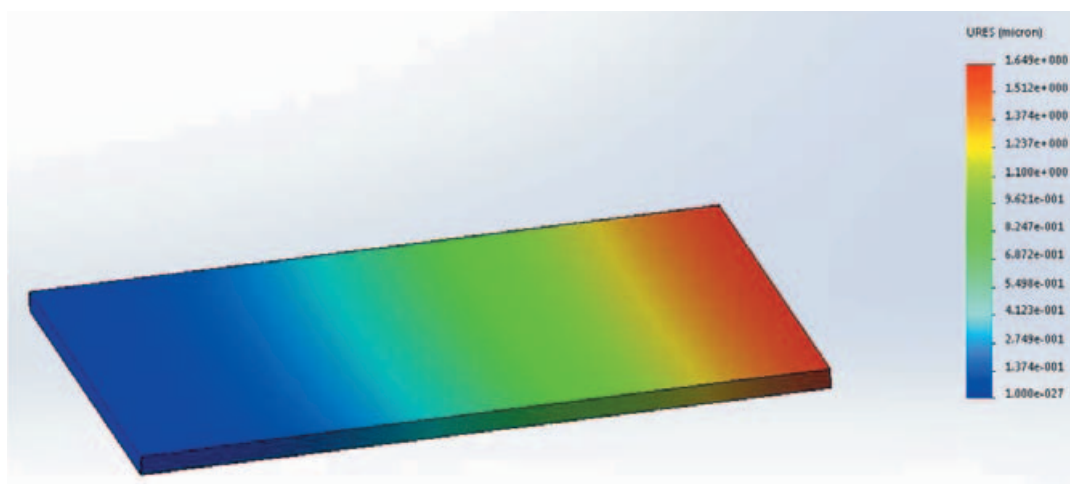


Рис. 7. Зависимость деформации структуры от внешней силы

### Эксперимент.

На кремниевой пластине толщиной 460 мкм выращен термический оксид толщиной 0.6 мкм. Затем проведено высокотемпературное осаждение LPCVD нитрида кремния 0.13 мкм. После этого, сделана операция фотолитографии с обратной стороны, плазмохимическое травление (ПХТ)  $\text{Si}_3\text{N}_4$  0.13 мкм с обратной стороны, ПХТ  $\text{SiO}_2$  до Si и ПХТ Si (Bosch-процесс) до  $\text{SiO}_2$  с лицевой стороны. Экспериментальный технологический маршрут представлен на рисунке 8 ниже.

Таким образом, кремниевые стенки «колодцев» близки к вертикальным, что позволяет увидеть невооруженным глазом прозрачные диэлектрические плёнки. Фокусированным ионным пучком (ФИП) удалён в локальной области с лицевой стороны  $\text{Si}_3\text{N}_4$  до  $\text{SiO}_2$ , таким образом, сформирована балка из нитрида кремния длиной 69.47 мкм и шириной 44.83 мкм (рис.9). Нельзя не отметить, что величина  $\delta$ , возникающая в результате жидкостного химического травления (ЖХТ) оксида кремния, крайне мала, т.к. отношение величины зазора между краем балки и периферией и величиной длины балки менее 1%.

Затем проведено определение величины зазора по лицевой стороне между краем балки и периферией нитридного слоя с помощью РЭМ, что представлено на рис.10.

Из рисунка 10 можно заметить, что исходный зазор составляет 4.89 мкм. Далее проведено ЖХТ в плавиковой кислоте  $\text{SiO}_2$  0.6 мкм, что позволяет освободить материал нитрида кремния. Сделано повторное определение величины зазора с помощью РЭМ (рис.11)

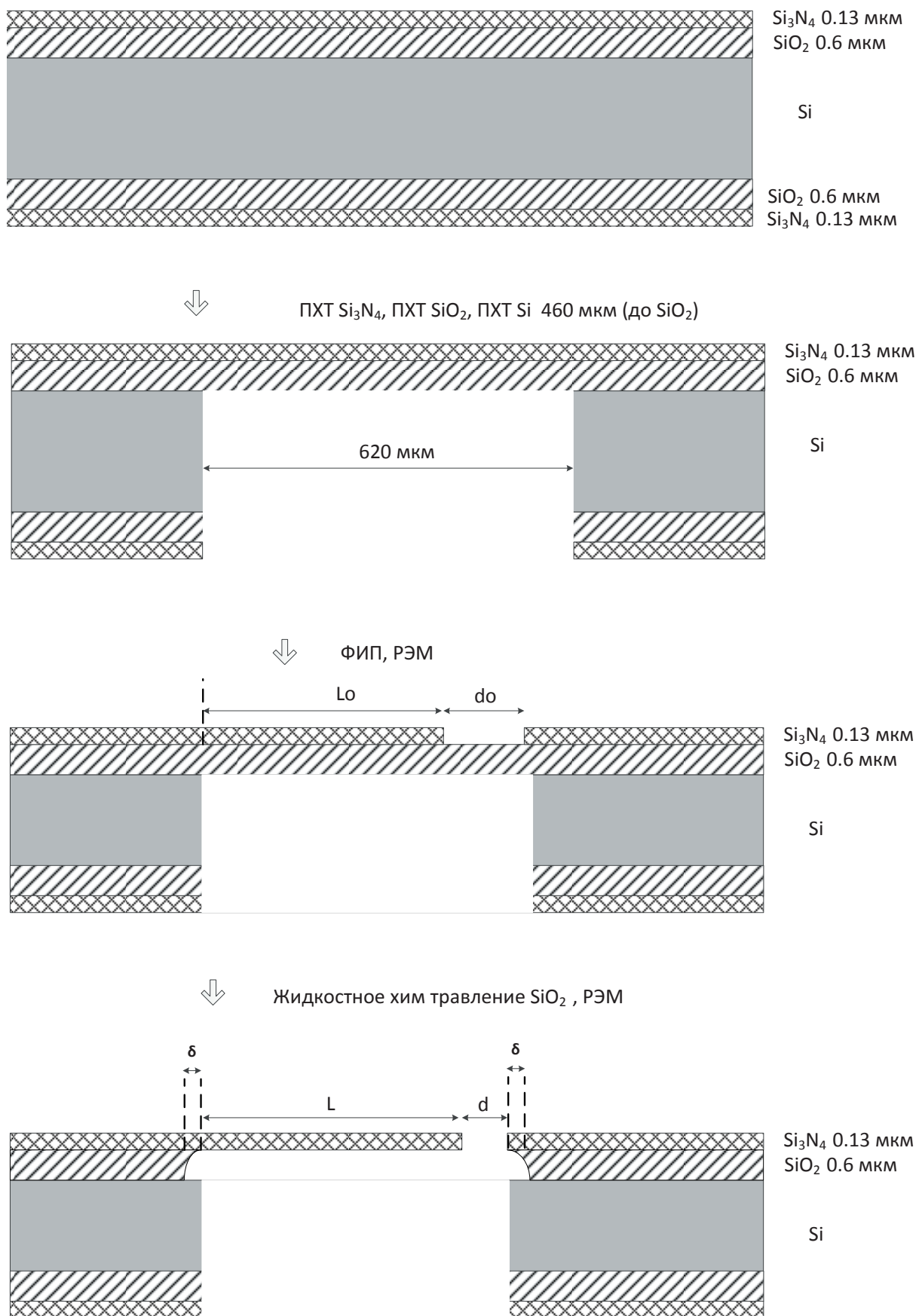


Рис. 8. Технологический маршрут

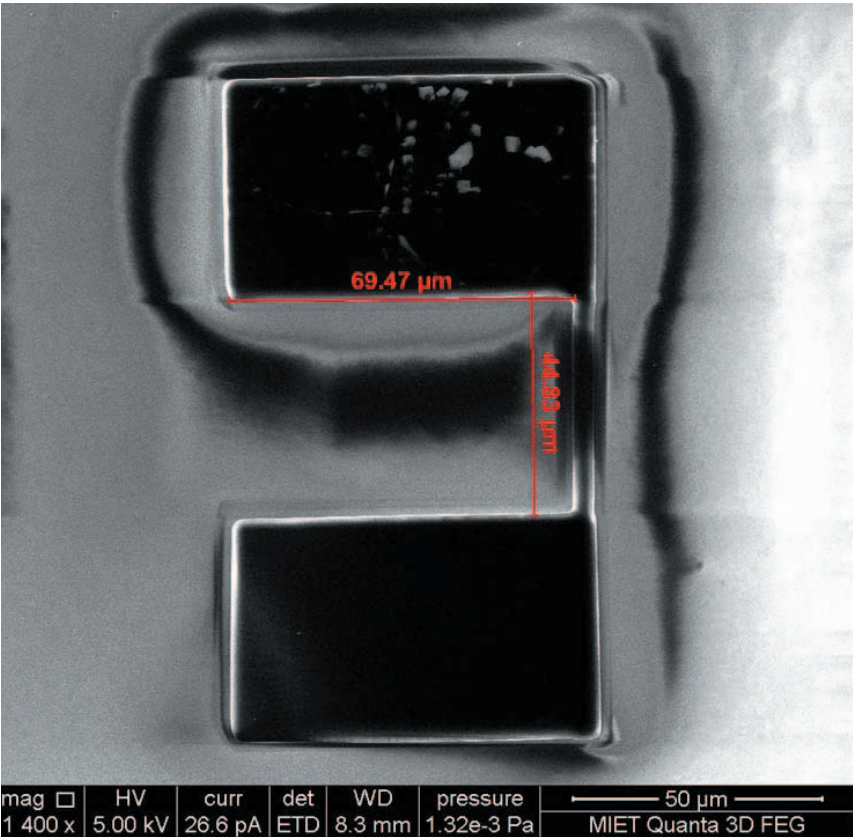


Рис. 9. Геометрия балки

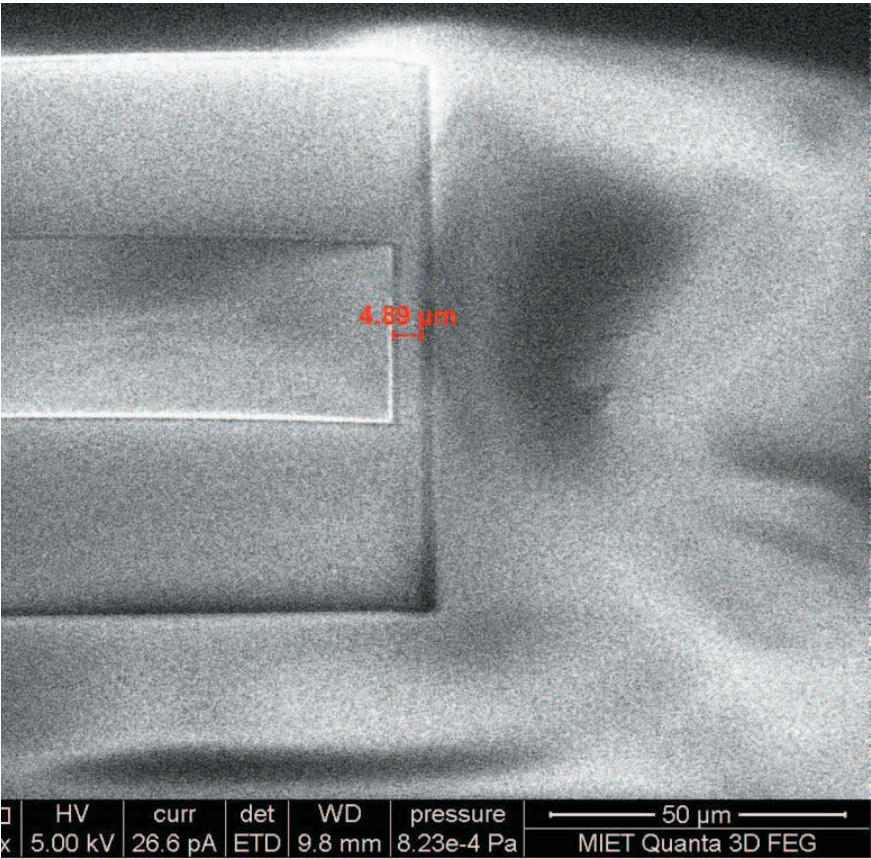


Рис. 10. Определение величины исходного зазора между краем балки и периферией

И  
Д  
Абсо  
Таки

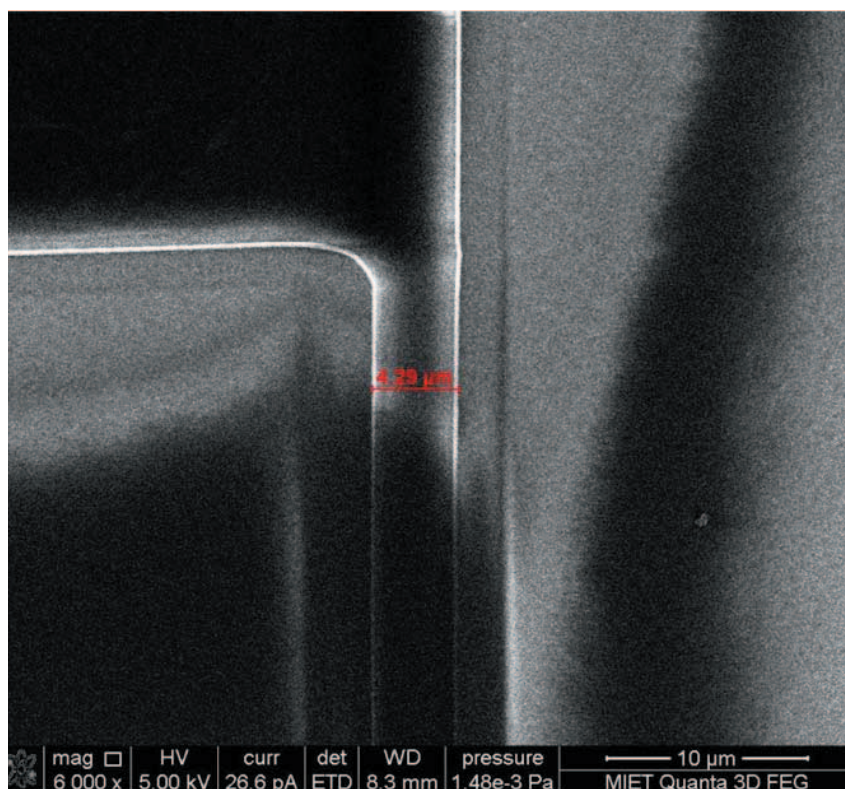


Рис. 11. Повторное определение величины зазора между краем балки и периферией после ЖХТ  $\text{SiO}_2$

Из рисунка 11 видно, что зазор уменьшился на 0.6 мкм.

Далее, по формуле (1) получено значение механических напряжений в -1.64 (ГПа). Абсолютная погрешность данного значения по формуле (3) составила около 20 (МПа). Таким образом, относительная погрешность составляет 1.2 %.

Далее с помощью бесконтактного оптического профилометра Veeco Wyko NT9300 проведено определение рельефа поверхности балки, что показано на рис.12.

Из рис.11 можно заключить, что свободный край балки изгибается в сторону от подложки. Кроме того, величина изгиба прямо пропорциональна расстоянию до закреплённого конца балки. Стрела прогиба составляет 1 мкм.

Далее, легко оценить, насколько изгиб поверхности влияет на точность оценки длины балки. Рассмотрим прямоугольный треугольник, в котором гипотенуза (длина балки) составляет 69.47 мкм, а высота равна стреле прогиба. По теореме Пифагора вычисляем второй катет: 69.46 мкм. Разница между гипотенузой и большим катетом составляет 10 нм, что является размером порядка погрешности измерения линейных размеров с помощью РЭМ. Следовательно, изгиб балки из нитрида кремния незначителен для определения длины сформированного материала.

### Заключение.

Разработан способ определения величины механических напряжений, который может быть использован для различных материалов, используемых в МЭМС технологии; проведена апробация способа на нитриде кремния. По сравнению с известными способами предложенный метод подготовки структур для исследования обладает рядом пре-

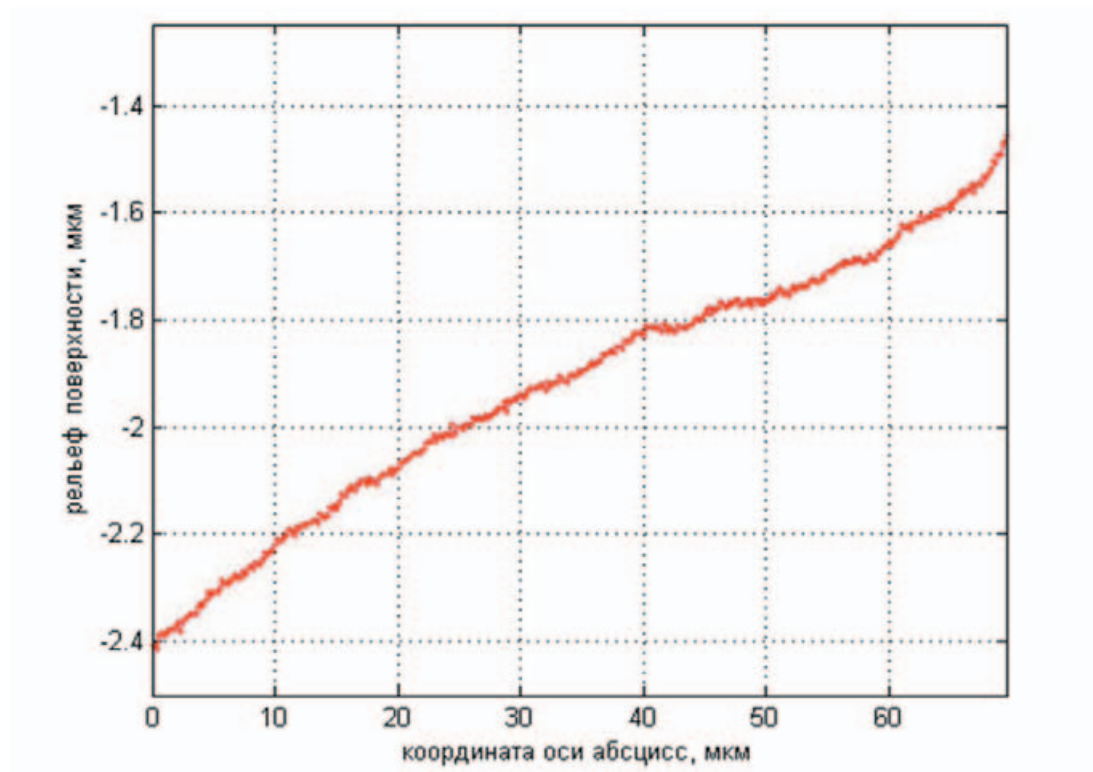


Рис. 12. Рельеф поверхности балки

имущества: время травления кремния значительно уменьшено благодаря замене жидкостного травления [37,39] на плазмохимическое; использование безмасочной фотолитографии [40] (фокусированного ионного пучка) позволяет локализовать область измерения напряжений и проводить исследования на рабочих пластинах.

Используя РЭМ, определена величина изменения размеров исследуемой структуры (деформации) в результате производимых технологических операций. Рассчитано значение механических напряжений нитрида кремния, которое составило -1.64 (ГПа), относительная погрешность составила 1.2 %. Численное значение механических напряжений хорошо коррелируют с данными, полученными косвенным методом с помощью профилометра [34].

Доказано, что изгиб балочной структуры на основе  $\text{Si}_3\text{N}_4$  незначительно влияет на точность определения её длины.

### Поддержка

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «МСТ и ЭКБ» МИЭТ по госконтракту с Минобр №14.594.21.0012 (RFMEFI59417X0012).

### Литература

1. *Fukazawa, T., Mizukoshi, M., Asai, A., Hara, K.*, High temperature semiconductor pressure sensor for automobiles // SAE Technical Papers, 1986, DOI: 10.4271/860473
2. *Ishida, Toru, Kanno, Masashi, Makino, Osamu*, Capacitive pressure sensor for automobiles // National technical report, 1983, 29(1), pp. 128-136

3. *Inui, T., Minorikawa, H., Nishihara, M.* High reliability semiconductor pressure sensor for automobiles // SAE Technical Papers, 1982, DOI: 10.4271/820515
4. *Sepahpour B.*, Introducing "MEMS" to undergraduate "ME" students // ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings, 2009
5. *Мазуркин Н.С.*, кан. диссертация // МИЭТ, 2017
6. *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, стр. 644-647
7. *Chen, M., Frueh, J., Wang, D., Lin, X., Xie, H., He, Q.* Polybenzoxazole, Nanofiber-Reinforced Moisture-Responsive Soft Actuators // Scientific Reports, 1 December 2017, Volume 7, Issue 1, Article number 870, DOI: 10.1038/s41598-017-00870-w
8. *Zhao, H., Zhang, T., Qi, R., Fei, T., Lu, G.*, Organic-inorganic hybrid materials based on mesoporous silica derivatives for humidity sensing // Sensors and Actuators, B: Chemical, September 2017, volume 248, 1, Pages 803-811, DOI: 10.1016/j.snb.2016.11.104
9. *Bhattacharjee, M., Nemade, H.B., Bandyopadhyay, D.* Nano-enabled paper humidity sensor for mobile based point-of-care lung function monitoring, Biosensors and Bioelectronics, volume 94, 15 August 2017, Pages 544-551, DOI: 10.1016/j.bios.2017.03.049
10. *Guo, F., Huang, J., Zhang, X., Liu, H., Li, B.* A classification method for moving targets in the wild based on microphone array and linear sparse auto-encoder // Neurocomputing, 7 June 2017, volume 241, Pages 28-37 DOI: 10.1016/j.neucom.2017.01.073
11. *Croce, M., De Berti, C., Crespi, L., Malcovati, P., Baschiroto, A.* Cap-less audio preamplifiers for silicon microphones // Proceedings of IEEE Sensors 5 January 2017, Article number 7808720, DOI: 10.1109/ICSENS.2016.7808720
12. *Huang, Y., Li, Y., Yan, P., Sugiyama, S.*, Development of an ion concentration measurement device integrated with blood extraction microneedle // Nanotechnology and Precision Engineering, 15 November 2015, volume 13, Issue 6, Pages 458-462, DOI: 10.13494/j.npe.20150032
13. *Miguel, J.A., Lechuga, Y., Martinez, M.*, Analysis of fault injection in implantable capacitive blood-pressure sensors // BIODEVICES 2013 – Proceedings of the International Conference on Biomedical Electronics and Devices pp. 153-158
14. *Kalvesten, J.E., Smith, L., Tenerz, L., Stemme, G.* First surface micromachined pressure sensor for cardiovascular pressure measurements // Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) 1998, Pages 574-579
15. *Baum, M., Haubold, M., Wiemer, M., Gessner, T.*, Implantable MEMS sensors and medical MEMS packaging issues for future implants // Biomedizinische Technik, 1 October 2014, Volume 59, Pages S1055-S1056, DOI: 10.1515/bmt-2014-5014
16. *Lim, L.S., Park, W.-T., Lou, L., Feng, H.H., Singh, P.*, Design, fabrication and characterization of ultra miniature piezoresistive pressure sensors for medical implants // Advanced Materials Research, 2011, volume 254, Pages 94-98, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.254.94
17. *Luo, W.F., Chen, R.H., Ma, H.K.*, Concept of the partial throw-away design of piezoelectric micropump for medical uses with low cost and waste // Applied Mechanics and Materials, 2014, volume 477-478, Pages 363-367, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.477-478.363
18. *Woitschach, O., Sosna, C., Lang, W., Uckelmann, J.* A new generation of a regulated micropump for medical applications // Proceedings of IEEE Sensors 2010, Article number 5690074, Pages 2472-2477, DOI: 10.1109/ICSENS.2010.5690074
19. *Дюжев Н.А., Махиборода М.А., Преображенский Р.Ю., Демин Г.Д., Гусев Е.Э., Дедкова А.А.*, Разработка и исследование концептуальной модели рентгеновского источника с автоэмиссионным катодом

- дом // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2017, №4, стр.64-70, DOI: 10.7868/S0207352817040060
20. Дюжнев Н.А., Гусев Е.Э., Махиборода М.А., Грязнева Т.А., Демин Г.Д., Моделирование технологического процесса формирования катодно-сеточного узла и его эмиссионных свойств // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2016. Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемповского. М.: ИПИМ РАН, 2016. Часть IV. С. 37-42.
  21. Gusev E.E., Gryazneva T.A., Negencev A.V., Makhaboroda M.A., The influence of heat treatment on the magnitude of mechanical stresses in the process of forming a field emission cathode-grid node // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2017, p.1397-1400, DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910831.
  22. Volkov, P.G., Korobeinikov, S.I., Nikolaev, V.I., Sovkov, V.B., Experimental observation and numerical simulation of spectra of solid-anode X-ray tubes // Journal of Analytical Chemistry, 1 May 2016, volume 71, Issue 5, Pages 471-475, DOI: 10.1134/S1061934816030151
  23. Schultz, G., Mhaskar, R., Prouty, M., Miller, J., Integration of micro-fabricated atomic magnetometers on military systems // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, volume 9823, 2016, DOI: 10.1117/12.2224192
  24. Khorgade, M.P., Gaidhane, A., Applications of MEMS in robotics and BioMEMS, Proceedings // UKSim 13th International Conference on Modelling and Simulation, UKSim 2011, Article number 5754275, Pages 522-527, DOI: 10.1109/UKSIM.2011.106
  25. Ibrahim, D., Using MEMS accelerometers in aerospace and defence electronics // Electronics World, August 2012, volume 118, Issue 1916, Pages 16-21
  26. Куреев В.Ю. Введение в технологии микро- и нанoeлектроники // М.: ФГУП «ЦНИИХМ», 2008. – 428 с.
  27. Solid State Technology Pulse, ссылка на электронный ресурс: <http://electroi.com/blog/2017/04/2016-marks-year-of-recovery-for-global-semiconductor-market/>
  28. Ссылка на электронный ресурс [http://www.yole.fr/2016\\_press\\_releases.aspx](http://www.yole.fr/2016_press_releases.aspx)
  29. Allameh, S.M.. An introduction to mechanical-properties-related issues in MEMS structures // Journal of materials science, 38, (2003) 4115-4123, ISSN: 1573-4803
  30. Dual, J.; Simons, G.; Villain, J.; Vollmann, J. & Weippert, C., Mechanical properties of MEMS structures // Proceedings of ICEM12, ISBN: 88-386-6273-8, Bari, Italy, August-September 2004, McGraw-Hill
  31. Yi, T. & Kim, C-J., Measurement of mechanical properties for MEMS materials // Measurement Science and Technology, 10, (1999) 706-716, ISSN: 1361-6501
  32. Kenichi Takahata, Micro Electronic and Mechanical Systems // ISBN 978-953-307-027-8, 386 pages, Publisher: InTech, Chapters published December 01, 2009 Chapter 11 Mechanical Properties of MEMS Materials by Zdravko Stanimirović and Ivanka Stanimirović
  33. Veikko Lindroos, Markku Tilli, Ari Lehto, Teruaki Motooka, Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies // Burlington, Elsevier, 2010
  34. Дюжнев Н.А., Дедкова А.А., Гусев Е.Э., Новак А.В., Методика измерения механических напряжений в тонких плёнках на пластине с помощью оптического профилометра // Известия Вузов. Электроника. 2016, №4, с.367 – 372.
  35. E.I. Bromley, J. N. Randall, D.C. Flanders, R.W. Mountain, A technique for the determination of stress in thin films // Journal of Vacuum Science & Technology B 1(4), 1983
  36. Телятник П.С., Осипов А.В., Кукушкин С.А., Релаксация деформаций несоответствия за счет пор и отслоений условия образования дислокаций, трещин и гофров в эпитаксиальной гетероструктуре AlN(0001)/SiC/Si(111) // Физика твердого тела, 2015, том 57, вып. 1

37. *Conru H.W.*, Measuring small area Si-SiO<sub>2</sub> interface stress with SEM // J. Applied Physics. American Institute of Physics, 1976, v.47, N 5, p.2079-2081.
38. *Курепин В. В., Баранов И. В.*, Обработка экспериментальных данных // Метод. указания к лабораторным работам для студентов 1, 2 и 3-го курсов всех спец./ Под ред. В. А. Самолетова. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2003. – 57 с.
39. *S.C.H. Lin and I. Pugacz-Muraszkiewicz*, Local stress measurement in thin thermal Si-SiO<sub>2</sub> films on Si substrates // Journal Applied Physics, January 1972, Vol. 43, No.1.
40. Способ контроля остаточных напряжений в кремниевой структуре покрытие SiO<sub>2</sub>–основа Si // Патент, Беларусь, BY 17232 C1, 2013.06.30

## MEASUREMENT OF MECHANICAL STRESSES IN A FRAGMENT OF A SILICON NITRIDE FILM

A.A. Dedkova, N.A. Djuzhev, E.E. Gusev,  
M.A. Makhaboroda, N.N. Patiukov

*National Research University of Electronic Technology, Moscow*

bubbledouble@mail.ru

Received 29.10.17

A method for determining mechanical stresses has been developed. The method is based on an analysis of change in the geometry of a film fragment after release from the substrate. The technological route is modeled in TCAD programm to form a beam structure of silicon nitride. The dependence of the deflection of a structure under the action of gravity is studied using SolidWorks program. Experimental preparation of structures is carried out using a focused ion beam. A scanning electron microscope is used to determine linear dimensions. The mechanical stresses in silicon nitride are - 1.64 GPa, the relative error is 1.2%. The value of the mechanical stresses correlate well with the data obtained by other methods. This method can be used for various materials used in MEMS technology.