

УДК 531.781

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ГРАНИЦАХ РАЗДЕЛА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ КРЕМНИЙ-НА-ИЗОЛЯТОРЕ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДАВЛЕНИЯ С ИЗОЛИРОВАННОЙ ТЕНЗОРАМКОЙ

© 2019 г. Л. В. Соколов*

Акционерное общество “Раменское приборостроительное конструкторское бюро”, Раменское, Россия

*E-mail: sokolov@niiio.ru

Поступила в редакцию 29.04.2019 г.

После доработки 10.06.2019 г.

Принята к публикации 27.07.2019 г.

Проведено исследование упругих напряжений на границах раздела микромеханической структуры “кремниевая тензорамка–слой стекловидного диэлектрика–кремниевая мембрана” и топологии локальной области на поверхности переходного слоя чипа микроэлектромеханического преобразователя давления с изолированной 3D-тензорамкой.

DOI: 10.1134/S0367676519110255

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы отчетливо наблюдается тенденция внедрения микромеханических преобразователей на основе кремния или гетероструктуры кремний-на-изоляторе (КНИ) в новые разработки различных отраслей промышленности и прежде всего авиационной и ракетно-космической: микромеханические акселерометры и гироскопы инерциальных систем, микроэлектромеханические датчики давления аэрометрических систем и систем автоматического управления.

Остаточные и вносимые механические напряжения, возникающие в процессе производства микромеханических преобразователей, исходных полупроводниковых пластин и пластин с гетероструктурами, являются основными причинами погрешности измерения физико-механических величин, особенно в жестких условиях эксплуатации авиационной и ракетно-космической техники.

Известны теоретические исследования в области физики твердого тела с приближенной оценкой упругих деформаций на пластинах из изотропных материалов и моделях простейших кристаллической решеткой [1]. Из экспериментальных исследований известно, что на КНИ-пластинах с гетероструктурой “кремний–слой стекловидного диэлектрика–кремний”, полученных методом термоэлектростимулированного соединения, возникает проблема образования нанокластеров стекла в переходном слое на границе раздела кремний–стекло [2].

Однако экспериментальные исследования по определению упругих деформаций на профилированных пластинах с КНИ-гетероструктурой типа “кремниевая тензорамка–слой стекловидного диэлектрика–кремниевая мембрана” не известны. При исследовании упругих напряжений на таких структурах методом компьютерного моделирования [3] не известна точность полученных результатов, обусловленная степенью неадекватности модели.

В настоящее время еще недостаточно исследованы причины, обуславливающие остаточные и вносимые механические напряжения в процессе производства микромеханических преобразователей как фактор нестабильности преобразовательной характеристики датчиков.

Исследования напряжений и топологии поверхностей на границах раздела переходных областей кремний–диэлектрик–кремний позволяют провести качественный анализ возможных причин образования центров механических напряжений в микромеханической структуре преобразователя.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются упругие напряжения на границах раздела микромеханической КНИ-гетероструктуры “кремниевая тензорамка–слой стекловидного диэлектрика–кремниевая мембрана” и топология локальной области на

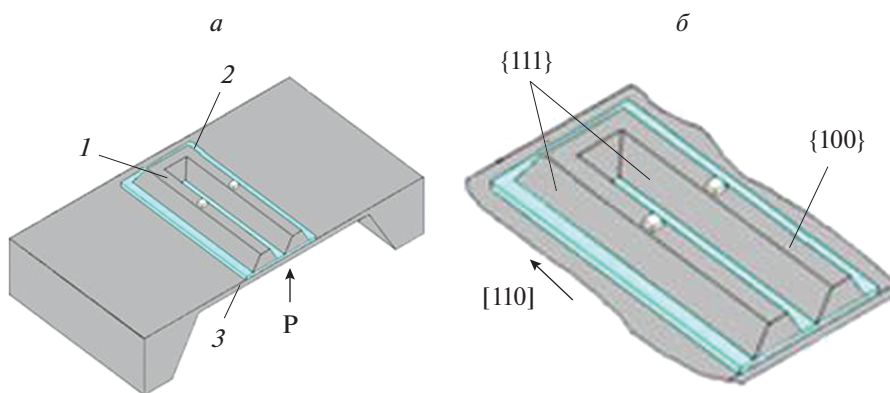


Рис. 1. *а* – Поперечное сечение чипа тензопреобразователя: 1 – монолитная тензорамка, 2 – тонкий диэлектрический слой, 3 – мембрана. *б* – Расположение кристаллографических плоскостей и направлений на тензорамке.

поверхности переходного слоя “кремний–стекло” чипа тензопреобразователя.

В чипе тензопреобразователя, показанном на рис. 1, тензорамка трапециевидного сечения соединена своим широким основанием через тонкий слой стекла с мембраной и одновременно является и функциональным (мостовая измерительная схема), и конструктивным элементом микромеханической структуры преобразователя. В поперечном направлении тензорамка своими длинными сторонами максимально приближена к продольной оси симметрии, которая совпадает с кристаллографическим направлением [110] кремния, рис. 1б [4]. В качестве изолирующего слоя использовался стекловидный диэлектрик на основе оксидов $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, температурный коэффициент расширения (ТКР) которого хорошо совпадает с ТКР кремния в рабочем диапазоне температуры преобразователя. Микромеханическую структуру формировали двухсторонним анизотропным химическим травлением монокристаллического кремния на КНИ-пластине, полученной методом прямого термокомпрессионного сращивания [5].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

С помощью микроскопа комбинационного рассеяния SenterraII фирмы ООО “Bruker” определяли значения пиков волнового числа в напряженном состоянии чипа тензопреобразователя, обусловленном остаточными механическими напряжениями, в заданных точках вблизи углов тензорамки (рис. 2а, 2б) и вблизи центра рамки в поперечном направлении (рис. 2в). Кроме этого – в виде цветовой схемы вблизи углов тензорамки в трехмерном изображении (рис. 3а) и на плоскости (рис. 3б). По измеренным значениям пиков

выполнен расчет напряжений (в МПа) по известной формуле [6]:

$$\sigma = -435(W - W_0),$$

где W – пик волнового числа в напряженном состоянии чипа тензопреобразователя, $W_0 = 520.5$ – пик волнового числа в ненапряженном состоянии кремния.

Полученные расчетные значения предельных статических напряжений сжатия в поперечном направлении вблизи центра рамки сравнивали с известными статическими напряжениями в микромеханических кремниевых структурах-аналогах [6].

На изображении переходного слоя 4 (рис. 4а) выделена в увеличенном масштабе локальная область 1 (рис. 4б) для изучения топологии поверхности переходного слоя. Топология поверхности переходного слоя исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа HitachiTM-3000.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Двум точкам вблизи углов тензорамки (красной – вблизи продольной оси симметрии и синей – в углу рамки, рис. 2а) соответствуют сдвиги пиков (рис. 2б) влево относительно пика волнового числа в ненапряженном состоянии кремния $W_0 = 520.5$. Такой сдвиг (рамановский сдвиг) характеризует напряжения сжатия в указанных точках на чипе тензопреобразователя (рис. 2а). При этом уровень напряжения в синей точке несколько больше, чем в красной, что соответствует теории микромеханики для мембраны с рельефной поверхностью.

В табл. 1 приведены расчетные значения предельных статических напряжений сжатия в поперечном направлении вблизи центра рамки в сравнении с кремниевым микромеханическим

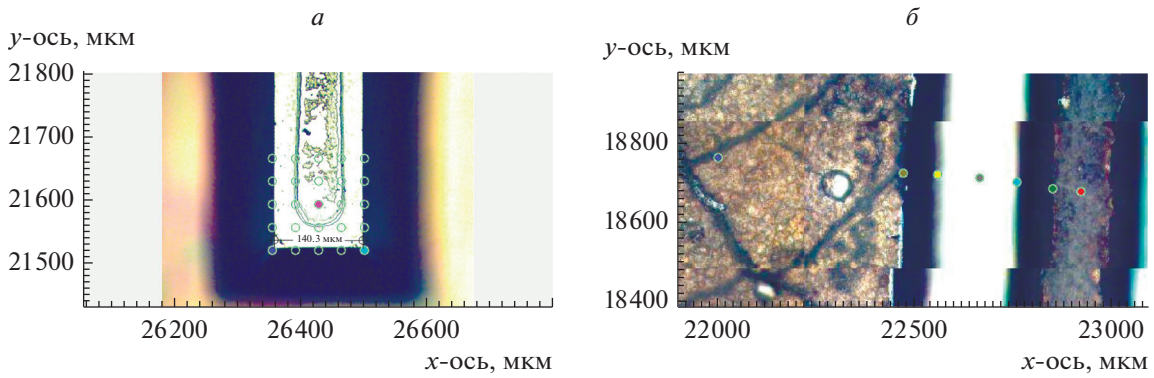


Рис. 2. *a* – Изображение фрагмента микромеханической структуры чипа тензопреобразователя с точками измерения упругих напряжений вблизи углов тензорамки с апертурой измерения 25 мкм: 1 и 2 – точки с максимальной величиной упругих напряжений. *б* – Изображение фрагмента микромеханической структуры чипа тензопреобразователя с точками измерения упругих напряжений вблизи центра рамки в поперечном направлении; диапазон изменения центра пика: $521.8\text{--}522.3\text{ см}^{-1}$.

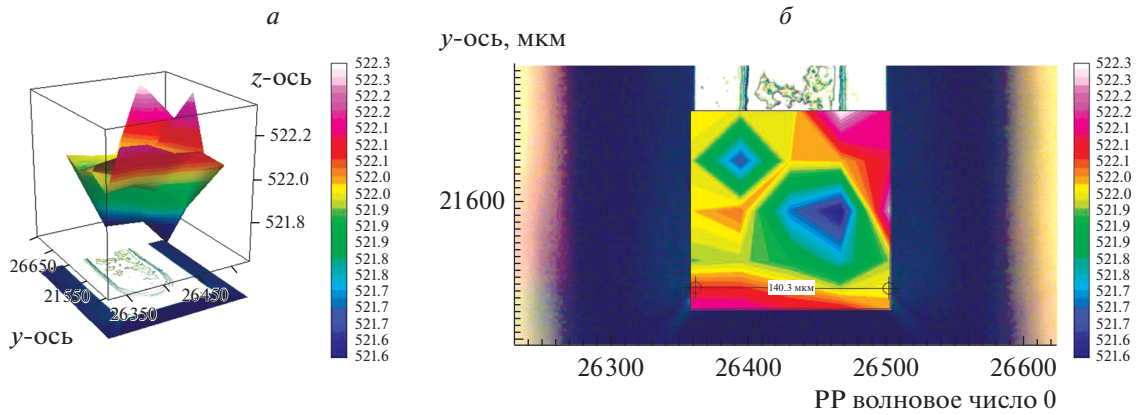


Рис. 3. *a* – Исследование остаточных напряжений в виде трехмерной цветовой схемы вблизи углов тензорамки. *б* – Исследование остаточных напряжений в виде двумерной цветовой схемы вблизи углов тензорамки. Диапазон изменения центра пика: $521.6\text{--}522.3\text{ см}^{-1}$.

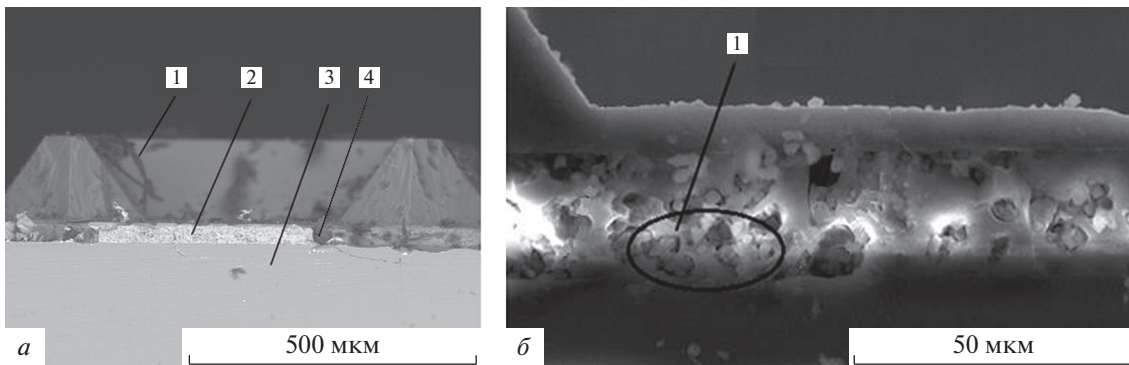


Рис. 4. *a* – РЭМ-изображение поперечного скола чипа тензопреобразователя с переходным слоем кремний–стекловидный диэлектрик–кремний: 1 – кремниевая тензорамка, 2 – слой стекловидного диэлектрика, 3 – кремниевая мембрана, 4 – область переходного слоя. *б* – РЭМ-изображение фрагмента переходного слоя стекло–кремний с локальной областью 1 для анализа.

Таблица 1. Расчетные значения предельных напряжений сжатия вдоль продольной оси чипа преобразователя в сравнении с кремниевым аналогом

Расчетные значения, МПа	
Экспериментальные образцы	МЭМС-аналог [7]
– 391.5	–200
– 870.0	–1000

аналогом. Наблюдается примерное совпадение интервалов предельных значений изменения величины напряжений в исследуемых образцах с кремниевыми микромеханическими структурами-аналогами [6].

Из результатов анализа цветовой схемы вблизи углов тензорамки в трехмерном изображении (рис. 3а) и на плоскости (рис. 3б) следует, что максимумы напряжений расположены на боковых гранях {111} рамки вблизи границы их пересечения с плоскостями {100}.

В переходном слое монокремний–стекловидный диэлектрик в локальной области под тензорамкой наблюдаются образования в виде наноразмерных кластеров, предположительно кластеров атомов кремния, а в приповерхностном слое кремния – локальные образования предположительно нанокластеров стекла (рис. 3, 4). Возможные причины таких образований – межфазные взаимодействия компонентов стекловидного диэлектрика в фазе пара с приповерхностным слоем монокремния в твердой фазе, сопровождающиеся взаимной диффузией компонентов стекловидного диэлектрика в кремний и атомов кремния в стекловидный диэлектрик. Возникающие в результате этих процессов дефекты в кремниевых слоях гетероструктуры могут быть причиной локальных механических напряжений в кремнии. Эти процессы объясняются теорией межфазных взаимодействий [7, 8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально установлен характер распределения статических упругих напряжений в локальных областях микромеханической структуры чипа КНИ тензопреобразователя давления с максимумами напряжений на боковых гранях {111} рамки вблизи границы их пересечения с плоскостями {100}, а также определены величины и знак напряжений сжатия. Установлено

примерное совпадение интервалов изменения величин предельных напряжений и знака напряжений с известными кремниевыми микромеханическими структурами-аналогами.

2. Проведен анализ возможных причин образования локальных центров зарождения напряжений в процессе формирования микромеханической структуры тензопреобразователя, а также в процессе производства КНИ-пластин. В переходном слое кремний–стекло обнаружены кластерные образования, предположительно атомов кремния, а также ионов бария и алюминия, входящих в состав синтезированного стекла $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$. Возможная причина – межфазные взаимодействия компонентов стекловидного диэлектрика в паровой фазе с приповерхностным слоем монокремния в твердой фазе в процессе термокомпрессионного срачивания кремниевых пластин. Локальные структурные изменения в переходном слое, обуславливающие дефекты дислокации в прилегающих кремниевых слоях гетероструктуры, могут стать причиной зарождения локальных центров механических напряжений в кремнии.

Автор выражает благодарность менеджеру ООО “Bruker” В.В. Репникову за совместные исследования упругих напряжений на образцах КНИ тензопреобразователей давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Работнов Ю.Н.* Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988. 712 с.
2. *Тимошенко С.П., Калугин В.В., Соколов Л.В., Парфенов Н.М.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2011. Т. 75. № 9. С. 1323; *Timoshenkov S.P., Kalugin V.V., Sokolov L.V., Parfenov N.M.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2011. V. 75. № 9. P. 1251.
3. *Sokolov L.V., Agafonova N.A.* // Proc. Int. Conf. Micro- and Nanoelectronics. (Moscow, 2016). P. 160.
4. *Sokolov L.V.* // Proc. 9th Int. Symp. Meas. Techn. Intelligent Instr. ISMTII-2009. (St. Petersburg, 2009). V. 3. P. 248.
5. *Кошелев Н.И., Семенов О.Ю., Ермолаева А.И.* // Персп. матер. 2000. Т. 6. С. 21.
6. *Woo Sik Yoo et al.* // J. Micro/Nanolithogr. MEMS. MOEMS. 2014. V. 13(1). Art. № 011205.
7. *Вавилов В.С., Киселев В.Ф., Мукашев Б.Н.* Дефекты в кремнии и на его поверхности. М.: Наука, 1990. 216 с.
8. *Соколов Л.В., Агафонова Н.А.* // XXVII Росс. конф. по электрон. микроск. RCEM-2018. (Черноголовка, 2018). Т. 2. С. 93.