

В. А. Гридчин, А. Д. Бялик

(Новосибирск)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
МЕМБРАННЫХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АМПЛИТУДНЫХ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ
ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

Рассматриваются вопросы моделирования профилированных кремниевых мембран как чувствительных элементов амплитудных волоконно-оптических датчиков давления. Оценена погрешность применения упрощенной модели, предложен вариант описания чувствительности микрозеркала волоконно-оптических датчиков в зависимости от ширины жесткого центра.

Введение. Применение оптических датчиков давления в измерительной технике неуклонно расширяется, что обусловлено такими их достоинствами, как возможность достижения высокой чувствительности, пожаро-, взрыво-, электробезопасность, нечувствительность к электромагнитным помехам [1–6]. Среди разнообразия оптических датчиков выделяются хорошим сочетанием технико-экономических характеристик амплитудные волоконно-оптические датчики (ВОД). Для амплитудных волоконно-оптических датчиков не требуется обязательного использования когерентного оптического излучения и интерферометров, допускается применение многомодовых оптических волокон в отличие, например, от интерферометрических датчиков. Следствием этого является возможность использования различных типов приемников и источников излучения, простота настройки и сочленения оптических волокон с другими элементами конструкции, что упрощает и удешевляет датчики [7–10].

Принцип действия амплитудных ВОД рефлектометрического типа заключается в изменении интенсивности потока оптического излучения при отражении его от перемещающегося под действием давления q упругого микрозеркала. Поэтому при проектировании амплитудных ВОД исходят из анализа перемещения микрозеркала относительно неподвижных оптических волокон в отличие от тензорезистивных датчиков, при проектировании которых важно учитывать изменение механических напряжений в упругих элементах или изменение емкости конденсатора с подвижной обкладкой в емкостных датчиках.

При изготовлении микрозеркал все шире применяется кремний, для которого имеются хорошие технологии обработки поверхности и формирования трехмерных структур. В литературе недостаточно сведений о проектировании амплитудных ВОД, изготавливаемых с применением микроэлект-

ронной технологии. Приводимые данные носят оценочный характер, без исследования точности используемых приближений (например, пробных функций, описывающих прогибы микрозеркала или неучет анизотропии упругих свойств кремния) [11–13]. Выбор геометрических параметров микрозеркала не увязан с нелинейностью его преобразовательной характеристики или метрологическими характеристиками датчика в целом. В имеющихся публикациях основное внимание уделяется микрозеркалам круглой формы, а не квадратной, хотя последние технологически предпочтительнее [8, 12].

Целью предлагаемой работы является математическое моделирование прогибов кремниевого микрозеркала квадратной формы, представляющего сложнопрофилированную жесткозакрепленную пластину, что позволяет в рамках единого подхода связать геометрические размеры с чувствительностью и нелинейностью по прогибам амплитудных волоконно-оптических датчиков. Результаты моделирования сравниваются с экспериментальными данными.

1. Моделирование прогибов микрозеркала. Формирование кремниевого микрозеркала обычно производится с помощью технологии анизотропного травления, а для уменьшения нелинейности его преобразовательной характеристики $w = w(q)$ центральная часть делается утолщенной («жесткий центр» (ЖЦ)) (рис 1). Из технологических соображений микрозеркало и жесткий центр имеют квадратную форму. В данной работе в целях сокращения объема вычислений рассматривается упрощенная модель микрозеркала без боковых скосов (рис. 2).

В области малых прогибов микрозеркала краевая задача имеет вид [4]:

$$D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x_1^4} + 2(D_{12} + D_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial x_2^4} = q, \quad w|_0 = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial n} \Big|_0 = 0, \quad (1)$$

где Γ – квадратный контур мембраны; n – внутренняя нормаль к контуру; $D_{i,j}$ – изгибные жесткости микрозеркала, $i, j = 1, 2, 6$ [14].

К настоящему времени получены решения задачи (1) только для случая, когда $D_{i,j}$ – постоянные коэффициенты, что соответствует пластинам постоянной толщины [14–16]. Особенностью микрозеркал ВОД является зависимость изгибных жесткостей $D_{i,j}$ от координат из-за изменяющейся толщины. По этой причине решение задачи (1) даже в простейшем случае неоднородности $D_{i,j}$ (см. рис. 2) возможно лишь численными методами. В данной работе для моделирования используется метод конечных элементов, реализованный при помощи пакета ANSYS.

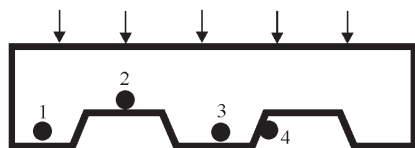


Рис. 1. Структура кремниевого микрозеркала: 1 – рамка, 2 – тонкая часть (мембрана), 3 – жесткий центр, 4 – боковой скос

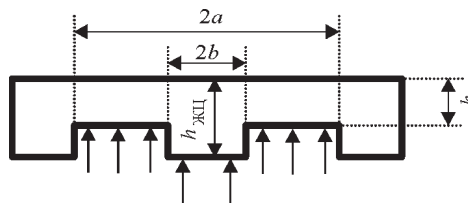


Рис. 2. Моделируемая структура: $2a, 2b$ – размеры сторон квадратной мембраны и жесткого центра; h и $h_{\text{ЖЦ}}$ – толщина мембраны и жесткого центра соответственно

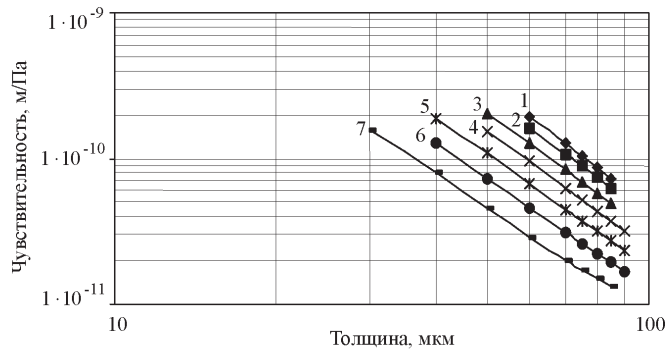


Рис. 3. Зависимость чувствительности микрозеркала от его толщины. Параметром является полуширина жесткого центра b (1 – 200; 2 – 400; 3 – 600; 4 – 800; 5 – 1000; 6 – 1200; 7 –

В ходе моделирования исследовались чувствительность S и нелинейность NI микрозеркала:

$$S = w/q; \quad NI = \frac{w_{\max} - w}{w_{\max}}, \quad (2)$$

где w_{\max} – прогиб зеркала при номинальном давлении $q = q_{\max}$; $w_{\max} - w$ – максимальное отличие между идеализированной прямолинейной и реальной $w = w(q)$ характеристиками микрозеркала.

На рис. 3 приведены результаты численного моделирования зависимости чувствительности микрозеркала S от его толщины h для разных размеров жесткого центра. Стороны микрозеркала ориентированы вдоль направлений [110].

Толщина жесткого центра существенно влияет на нелинейность преобразовательной характеристики микрозеркала. На рис. 4 представлены расчетные зависимости нелинейности от толщины жесткого центра при постоянных a , h и b . В области малой толщины $h_{\text{ЖЦ}}$ наблюдается максимум нелинейности, положение которого зависит от соотношения параметров h и b . Аналогичные зависимости для чувствительности микрозеркала максимумов

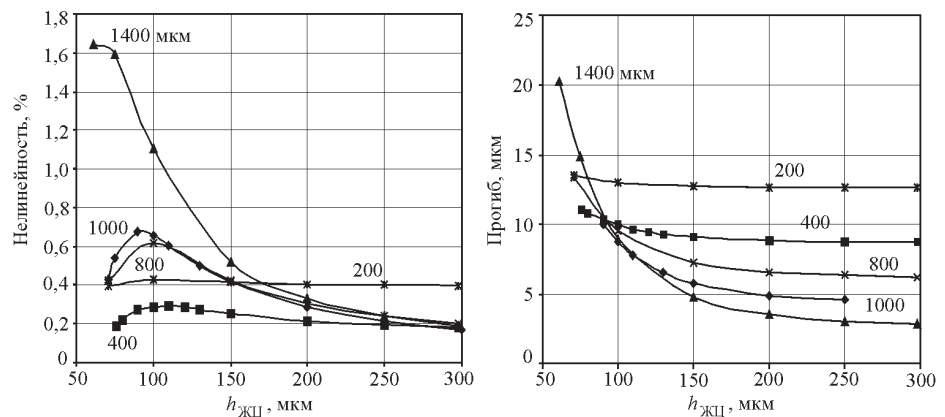


Рис. 4. Зависимость величин нелинейности и прогибов от толщины жесткого центра $h_{\text{ЖЦ}}$ микрозеркала. Параметром является полуширина жесткого центра b (мкм). Толщина микрозерка-

не имеют и монотонно убывают по мере роста толщины $h_{жц}$, при этом чем больше площадь жесткого центра, тем резче зависимость.

2. Экспериментальное исследование прогибов микрозеркала. Прогибы микрозеркала под действием давления измерялись на интерферометре Майкельсона, в одно плечо которого было введено микрозеркало. Прогиб микрозеркала можно менять, задавая различные давления. Источником света служил He-Ne-лазер ($\lambda = 0,63$ мкм), разрешение измерительной системы по перемещению составляло не менее $\lambda/4$. Давление на микрозеркало создавалось при помощи грузопоршневых манометров МП-04 и МП-6М класса точности 0,02. Исследования проводились на кремниевых микрозеркалах с тонкой частью размером $2a = 5$ мм и жестким центром $2b = 1,8$ мм. Толщина рамки и жесткого центра была одинакова: $h_{жц} = 420$ мкм, а общий размер чипа составлял 7×7 мм. При измерениях чип приклеивался рамкой к подложке держателя образца.

Микрозеркало входило в состав разработанного амплитудного волоконно-оптического датчика давления, общая структурная схема которого показана на рис. 5. Датчик содержит стабилизированный источник тока 1, оптический излучатель 3 с металлическим патроном 2 и фотоприемником 4, оптические волокна, собранные в волоконно-оптический жгут 5, мембранный чувствительный элемент (микрозеркало) 7, закрепленный на основании 6, согласующее устройство 9, цифровой индикатор 11, исполнительное устройство 12, устройство последующей обработки результата (компьютер) 13, блок термостабилизации 10 для исключения влияния изменений температуры окружающей среды на блоки 2 и 9; цифрой 8 обозначен ход световых лучей. Основание с мембранным чувствительным элементом соединено с волоконно-оптическим жгутом таким образом, что мембранный чувствительный элемент находится на строго определенном расстоянии от торца волоконно-оптического жгута.

Излучение от источника 3 вводилось в волоконно-оптический жгут 5 (в выпускающие волокна) через его торец, выходило из противоположного торца, отражалось от поверхности мембранного чувствительного элемента 7. Часть отраженного света попадала на торцы приемных волокон жгута 5 и затем на фотоприемник 4.

Толщина микрозеркала и его жесткого центра выбиралась в зависимости от рабочего диапазона давлений. Кремниевое основание 6 толщиной 2,5 мм

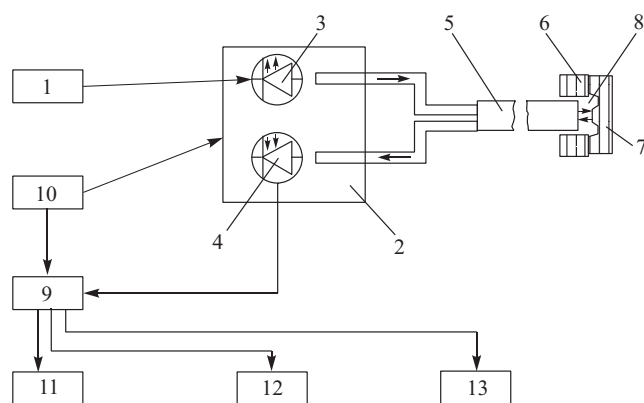


Рис. 5. Структурная схема амплитудного волоконно-оптического датчика давления

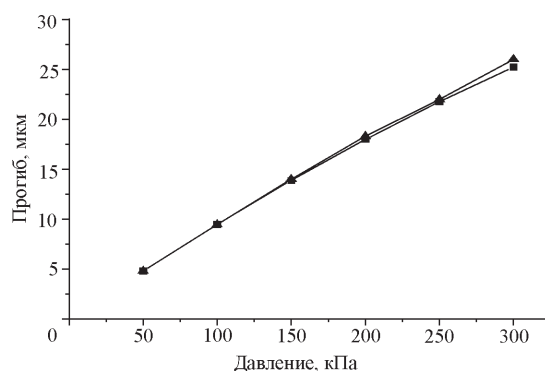


Рис. 6. Преобразовательные характеристики микрозеркала: a 2,5 мм, b 0,9 мм, h 40 мкм,

являлось «фундаментом» для чувствительного элемента и служило демпфером между ним и металлическим патроном-корпусом. Волоконно-оптический жгут представлял собой набор оптических волокон с диаметром сердечника 45 мкм и оплетки 100 мкм со случайным распределением волокон; волокна были заделаны в металлическую оправку таким образом, что торцы всех единичных волокон лежали в одной плоскости. Второй торец волоконно-оптического жгута был разделен на две части и заделан в патрон с источником и приемниками оптического излучения. Содержащиеся в жгуте оптические волокна имели затухание 0,17 дБ/км.

Расстояние между чувствительным элементом и торцом жгута определялось экспериментально по калибровочным характеристикам. Источником излучения выбран светодиод, работающий в ИК-диапазоне. Преобразовательный блок состоял из ИК-светодиода и усилителя выходного сигнала, выполненного в общем случае на трех прецизионных операционных усилителях, два из которых реализовали схему вычитания полезного сигнала из опорного, третий усиливал полученный сигнал.

На рис. 6 приведены расчетные и экспериментальные преобразовательные характеристики микрозеркала.

Данные, полученные в ходе математического моделирования упрощенной структуры микрозеркала (см. рис. 2), хорошо согласуются с результатами эксперимента. Отличия между численными и экспериментальными данными не превышают 5–7 %, что можно связать с заметной чувствительностью величин прогибов к выбору геометрических размеров в численной модели.

3. Обсуждение результатов. Исследование преобразовательной характеристики упругого элемента позволяет уточнить предел применимости теории малых прогибов пластин, который обычно формулируется в виде $w \ll kh$, где $k \approx 0,2$ для плоских пластин [14, 16]. Полученные экспериментальные данные и результаты моделирования показывают, что для обеспечения нелинейности не более 0,5 % коэффициент k не должен превышать 0,1, т. е. прогибы микрозеркала не должны превышать 10 % от его толщины. В противном случае растяжение срединной плоскости микрозеркала вносит заметный вклад в нелинейность преобразовательной характеристики ВОД. Этот эффект наблюдается и в тензорезистивных датчиках давления с плоскими упругими элементами [15].

Увеличение размеров жесткого центра приводит к уменьшению чувствительности микрзеркала. Теоретическое рассмотрение [15, 17] показывает, что для квадратного плоского кремниевого микрзеркала со сторонами, ориентированными вдоль кристаллографических направлений [110], размером $2a$ и толщиной h , чувствительность

$$S = 1,555 \cdot 10^{-12} (a^4/h^3), \text{ м/Па}. \quad (3)$$

Чувствительность оказывается обратно пропорциональной кубу толщины. Для микрзеркала с жестким центром чувствительность зависит от толщины мембраны, жесткого центра и их размеров в плоскости микрзеркала. В двойном логарифмическом масштабе эти зависимости (см. рис. 3), как и для плоской мембраны, представляются прямыми линиями, однако тангенс угла их наклона K и отрезок, отсекаемый на оси ординат Y_0 , зависят от ширины жесткого центра. Аппроксимируя результаты численного моделирования в полиномиальной форме, получаем:

$$\begin{aligned} \lg S &= Y_0 + K \lg h; \\ K &= 2,7294 + 4,69527 \cdot 10^{-4} b - 6,25109 \cdot 10^{-7} b^2; \\ Y_0 &= 4,78744 + 5,7363 \cdot 10^{-4} b - 1,39169 \cdot 10^{-6} b^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где $200 \leq b \leq 1500$ мкм. Ошибка аппроксимации не превышает 2%. Формулы (4) позволяют упрощенным путем определить чувствительность микрзеркала.

На рис. 7 представлены расчетные соотношения нелинейность/чувствительность для различных сочетаний h и b , рассчитанные на давление $q = 10^5$ Па.

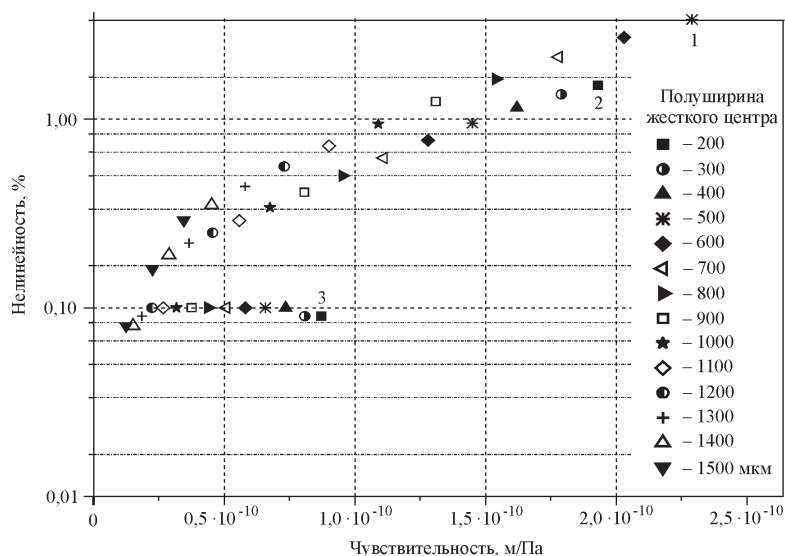


Рис. 7. Соотношение чувствительность/нелинейность упругого микрзеркала (толщина микрзеркала: 1 – 50; 2 – 60; 3 – 80 мкм). Параметром является полуширина жесткого центра b .

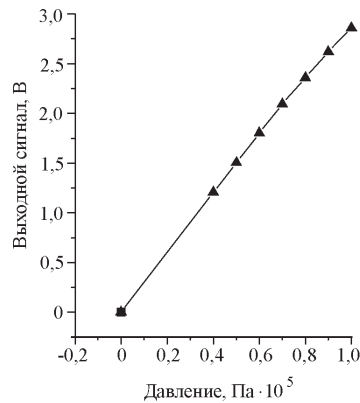


Рис. 8. Передаточная характеристика ВОД. Диапазон давлений 40–100 кПа. Мембранный чувствительный элемент с жестким центром, $a = 2,5$ мм, $b = 0,9$ мм, $h = 40$ мкм, $h_{жц} = 160$ мкм

Из приведенных зависимостей следует, что выбор геометрических размеров микрозеркала заметным образом влияет на соотношение нелинейность/чувствительность. Роль жесткого центра в снижении нелинейности весьма существенна. Как показывают расчеты, наличие жесткого центра даже небольшой толщины, удовлетворяющей соотношению $h_{жц}/h = 1,05–1,15$, обеспечивает лучшее соотношение нелинейность/чувствительность, чем его отсутствие на микрозеркале.

На рис. 8 приведена типичная преобразовательная характеристика ВОД давления с микрозеркалом, имеющим жесткий центр. Чувствительность датчика составляет 30 мВ/кПа, а нелинейность в диапазоне давлений $0–1 \cdot 10^5$ Па не превышает 1,5 %. Для тензорезистивных датчиков давления, имеющих в качестве чувствительного элемента плоскую кремниевую мембрану аналогичных размеров, нелинейность в 1,5 % наблюдается при давлении не выше $4 \cdot 10^3$ Па [18], что отражает действие большего числа факторов, влияющих на их нелинейность, по сравнению с волоконно-оптическими. В тензорезистивных датчиках вклад в нелинейность преобразовательной характеристики вносит, помимо нелинейности самого чувствительного элемента, еще и нелинейность тензорезистивного эффекта и мостовой схемы включения тензорезисторов.

Физически содержательной характеристикой ВОД давления является его оптическая чувствительность, определяемая как $S = \frac{\Delta I}{I_0 q}$, где I_0 — световой поток, падающий на фотодетектор при $q = 0$; ΔI — изменение светового потока под действием измеряемого давления. Для датчика с преобразовательной характеристикой, приведенной на рис. 8, $S = 1,67 \cdot 10^{-7}$ 1/Па, что сопоставимо с чувствительностью $S_T = R/R_0 q$ для тензорезистивных датчиков, где R/R_0 — относительное изменение сопротивления тензорезистора под действием деформации упругого элемента.

Заключение. Моделирование преобразовательной характеристики микрозеркала без учета боковых скосов согласуется с экспериментальными результатами в пределах 5–7 %, что применимо для практических целей.

Максимальный прогиб микрозеркала не должен превышать 10 % от его толщины для обеспечения нелинейности преобразовательной характеристики микрозеркала на уровне 0,1–0,5 %.

Зависимость нелинейности и чувствительности микрозеркала от конструктивных параметров носит сложный характер. При этом целесообразно исходить из требований минимизации нелинейности при обеспечении возможно более высокой чувствительности. Зависимость чувствительности микрозеркала от толщины мембраны в двойном логарифмическом масштабе представляет семейство прямых, параметры которых зависят от размеров жесткого центра. Предложенные аппроксимации этих зависимостей облег-

чают задачу конструирования микрозеркала с оптимизированной геометрией.

Применение в качестве чувствительных элементов микрозеркал мембранного типа с жесткими центрами позволяет создавать ВОД давления с нелинейностью преобразовательной характеристики около 1 % с более широким диапазоном измерения давления, чем у традиционных тензорезистивных с плоскими упругими элементами при сопоставимых величинах чувствительности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бусурин В. И., Носов Ю. Р. Волоконно-оптические датчики: физические основы расчета и применения. М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Волоконно-оптические датчики: Пер. с япон. /Под ред. Т. Окоси. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Зак Е. А. Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией. М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. Vaganov V. I. Construction problems in sensors // *Sensors and Actuators A*. 1991. 28. P. 161.
5. Зак Е. А., Тув А. Л. Особенности проектирования рефлектометрических ВОД перемещений // *Измер. техника*. 1997. № 1. С. 28.
6. Таланчук П. М., Голубков С. П. Сенсоры в контрольно-измерительной технике. Киев: Техника, 1991.
7. Ning Y. N., Grattan K. T. V., Palmer A. W. Fibre-optic interferometric systems using low-coherence light sources // *Sensors and Actuators A*. 1992. 30. P. 181.
8. Xiao Z., Engstrom O., Vidovic N. Diaphragm deflection of silicon interferometer structures used as pressure sensors // *Sensors and Actuators A*. 1997. 58. P. 99.
9. Qi W., Ning Y. N., Grattan K. T. V. A multimode optical-fibre sensing system using white-light interferometry and two-wavelength synthetic source // *Ibid.* P. 191.
10. Gambling W. A. Optical fiber for sensors // *Sensors and Actuators A*. 1991. 25–27. P. 99.
11. Tohyama O., Kohashi M., Yamamoto K., Itoh H. A fiber-optic microsensor for biomedical applications // *Sensors and Actuators A*. 1998. 66. P. 150.
12. Libo Y. Fiber-optic diaphragm pressure sensor with automatic intensity // *Sensors and Actuators A*. 1991. 28. P. 29.
13. Pinnock R. A. Optical pressure and temperature sensors for aerospace applications // *Sensors Rev.* 1998. 18, N 1. P. 32.
14. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963.
15. Гридчин В. А. Проектирование кремниевых интегральных тензопреобразователей с квадратными упругими элементами // *Полупроводниковые тензорезисторы*. Новосибирск: НЭТИ, 1985. С. 97.
16. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник /Под ред. И. А. Биргера, Л. Г. Пановко. М.: Машиностроение, 1968.
17. Гридчин В. А., Драгунов В. П. Физика микросистем. Новосибирск: НГТУ, 2004. Ч. 1.
18. Гридчин В. А., Лисофенко А. П., Афанасьев С. А. Пределы применимости модели малых прогибов тензопреобразователей мембранного типа // *Межвуз. сб. науч. тр. «Полупроводниковая тензометрия»*. Новосибирск: НЭТИ, 1988. С. 71.