

Исследование изменения реальной формы круглых тонкопленочных мембран при реализации метода выдувания

© А.А. Дедкова, Н.А. Дюжев

Национальный исследовательский университет „МИЭТ“,
124498 Зеленоград, Москва, Россия
e-mail: dedkova@ckp-miet.ru

Поступило в Редакцию 7 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 7 апреля 2022 г.

Принято к публикации 7 апреля 2022 г.

Проведено исследование степени сферичности реальной формы круглых тонкопленочных мембран при ее изменении в процессе реализации метода выдувания. Изучены сформированные Bosch-процессом круглые тонкопленочные мембраны со структурой $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$, $\text{pSi}^*/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$, Al и др. Описана методика, позволяющая определить области отклонения формы поверхности мембраны от сферической, оценить величину и характер распределения радиуса кривизны вдоль диаметра мембраны. Показано, что форма мембран отличается от сферической ближе к области закрепления, а также во многих случаях и к области вершины (центра) мембраны. Также обнаружена тенденция к увеличению радиуса кривизны по мере приближения к центру мембраны.

Ключевые слова: тонкие пленки, мембрана, механические характеристики, механические напряжения, деформация, прогиб, микроэлектромеханические системы, МЭМС, круглая мембрана, кремниевая подложка, оптическая профилометрия, избыточное давление, метод выдувания, поверхность, рельеф, радиус кривизны, кривизна.

DOI: 10.21883/JTF.2022.08.52793.86-22

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется анализу напряженно-деформированного состояния, возникающего в микроэлектромеханических системах. Исследовались закрепленные на контуре круглые в плане мембраны, сформированные из созданных на кремниевой подложке тонких пленок, после глубокого сквозного травления кремния с обратной стороны пластины (Bosch-процесс) [1–4]. Такие мембраны применяются в рентгеновской оптике [2], в качестве чувствительных элементов датчиков различных физических величин [5,6] и др.

Для определения механических характеристик мембран (составляющих их пленок) широко используется метод выдувания, а для анализа получаемых экспериментальных данных — соотношения теории тонких пластин и оболочек, с различными модификациями [1,2,7–22]. Метод заключается в подаче на мембрану одностороннего избыточного давления с ее обратной стороны, анализе зависимости величины прогиба мембраны от значения приложенного давления, расчете механических характеристик из этой зависимости (модуль Юнга или др.).

При этом часто предполагается, что мембрана под нагрузкой принимает сферическую форму. Ранее авторами было показано [1], что реальная начальная форма сформированных Bosch-процессом мембран не является плоской или сферической — мембраны часто подобны усеченному конусу, могут быть выпуклыми и вогнутыми,

содержать складки и др. Этот эффект вероятно является следствием остаточных напряжений в пленке на подложке до формирования мембраны. Под действием избыточного давления мембрана визуально становится подобна сегменту сферы — выпуклому вверх куполу [1]. Для анализа напряженно-деформированного состояния таких мембран под действием приложенного избыточного давления (P) — необходимо подробно исследовать изменение реальной формы мембран и оценить степень ее близости к сфере.

Настоящая работа посвящена разработке и использованию методики оценки степени сферичности реальной формы круглых тонкопленочных мембран при ее изменении в процессе реализации метода выдувания.

1. Оборудование

Метод выдувания реализован на разработанном авторами стенде, подробно описанном в предыдущих работах. Стенд выполнен на базе оптического профилометра Veeco Wyko NT 9300 и специальной оснастки для фиксации исследуемого образца и подачи на него избыточного давления [22]. Стенд позволяет анализировать изменение рельефа поверхности области с мембраной по мере увеличения подаваемого избыточного давления. Размер области измерения обычно составляет порядка 1.9–2.4 mm, размер сформированной матрицы высот 640×480 (рис. 1, а).

Программное обеспечение (ПО) оборудования Vision позволяет рассчитывать по профилям поверхности ра-

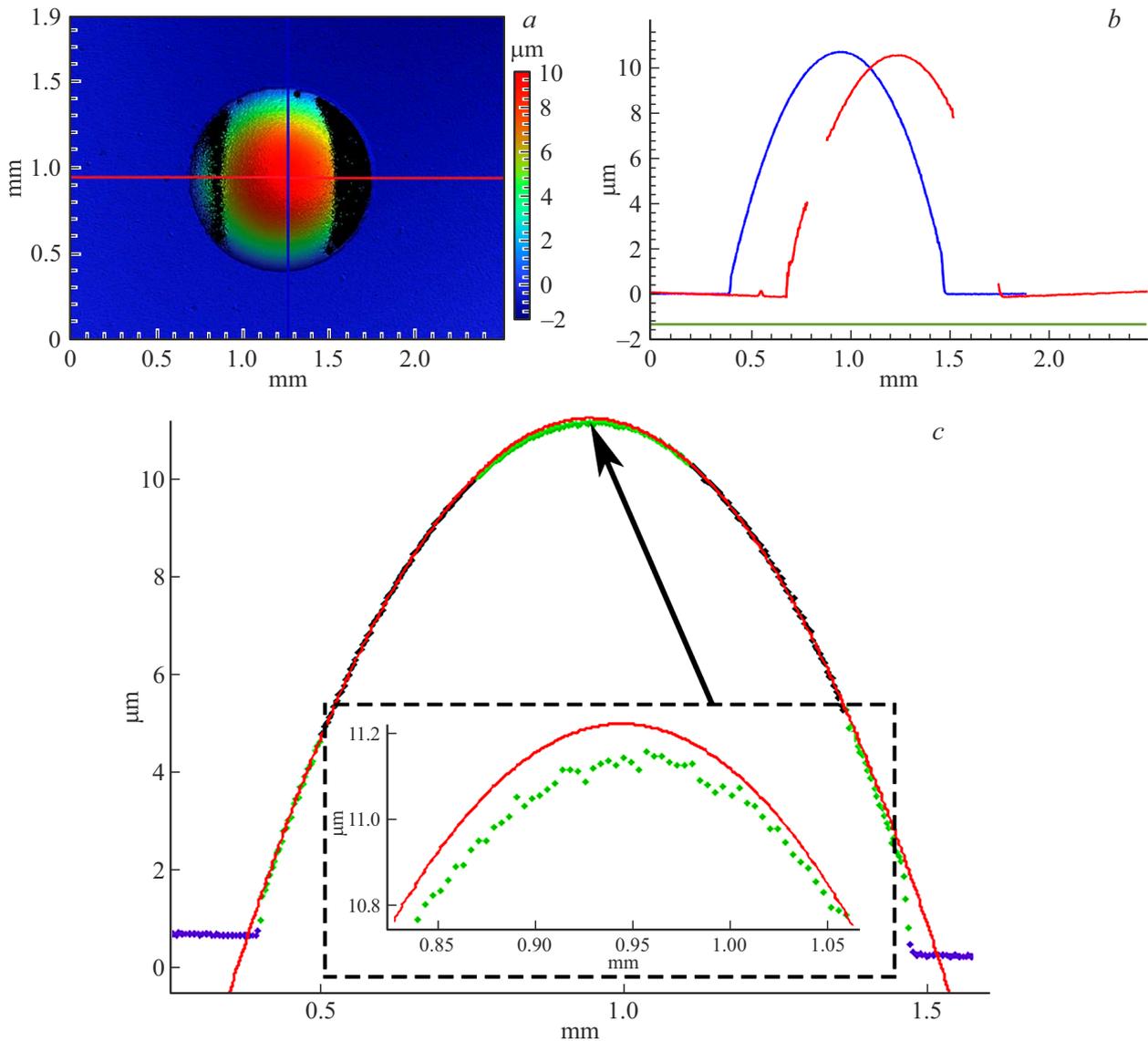


Рис. 1. Рельеф области с мембраной (а) и профили поверхности (b, c) мембраны Al ($0.6 \mu\text{m}$) при $P = 1.2 \text{ atm}$. Профиль мембраны Al ($0.6 \mu\text{m}$) при $P = 1.2 \text{ atm}$ (c): область мембраны показана зеленым (светлые точки) (в онлайн версии), используемая для аппроксимации область — черным (наиболее темные точки), аппроксимационная кривая — красным (в онлайн версии) (гладкая линия), подложка — фиолетовым (в онлайн версии). На картах рельефа поверхности (а) здесь и далее цветовая шкала от синего (наименьшие значения) до красного (наибольшие значения (в онлайн версии)).

диусы кривизны R (профили представлены на рис. 1, b). Для этого оператор задает границы отрезка на профиле (положение курсоров); производится расчет одного значения радиуса кривизны для этого отрезка. Однако это ПО не позволяет определить распределения радиусов кривизны R по профилям поверхности — зависимости изменения радиуса кривизны R вдоль профиля. Также Vision не позволяет непосредственно сравнивать аппроксимационные кривые и реальный профиль поверхности (выводится только информация о значении R для выбранного отрезка — одно число). Все это потребовало разработки описываемой в настоящей работе методики.

2. Образцы и модельные данные

Расчет радиусов кривизны проводился для следующих данных:

- полученных экспериментально данных для мембраны из монослоя Al толщиной $0.6 \mu\text{m}$ (рис. 1);
- полученных экспериментально данных для мембраны со структурой $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$, толщины слоев SiN_x — $0.13 \mu\text{m}$, SiO_2 — $0.5 \mu\text{m}$ (рис. 2);
- полученных экспериментально данных для многослойной Al мембраны: 20 слоев Al суммарной толщиной $0.6 \mu\text{m}$, с использованием ионной бомбардировки после осаждения каждого слоя (рис. 3);

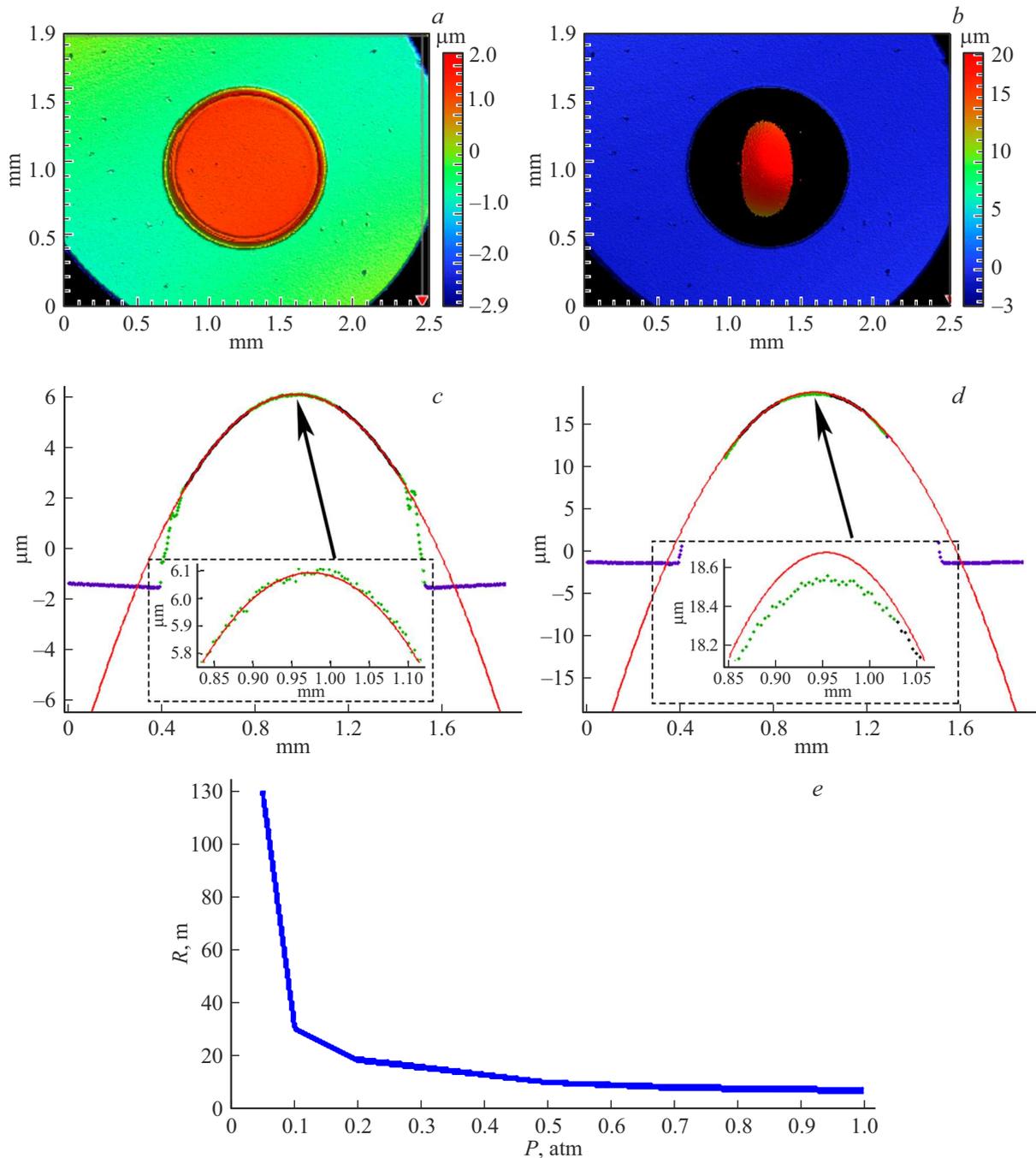


Рис. 2. Рельеф области с $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$ -мембраной (*a, b*) и профили поверхности (*c, d*) мембраны при $P = 0$ (*a*), 0.1 atm (*c*), 0.5 atm (*b, d*). Цветовое разбиение на (*c, d*) — аналогично рис. 1, *c*. Зависимость рассчитанного радиуса кривизны R от приложенного избыточного давления (*e*).

— полученных экспериментально данных для мембраны со структурой $\text{pSi}^*/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$, толщины слоев pSi^* — $0.6 \mu\text{m}$, SiN_x — $0.13 \mu\text{m}$, SiO_2 — $0.5 \mu\text{m}$ (рис. 4);

— полученных экспериментально данных для мембраны Si (рис. 5);

— модельных данных мембраны, сформированной в COMSOL Multiphysics;

— модельных данных зашумленной дуги окружности, сформированной в Matlab.

Распределения радиусов кривизны приведены на рис. 6 для этих же данных:

— полученных экспериментально данных для мембраны из монослоя Al толщиной $0.6 \mu\text{m}$ (рис. 6, *a, b*);

— полученных экспериментально данных для мембраны со структурой $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$, толщины слоев SiN_x $0.13 \mu\text{m}$, SiO_2 — $0.5 \mu\text{m}$ (рис. 6, *c, d*);

— модельных данных мембраны, сформированной в COMSOL Multiphysics (рис. 6, *e*);

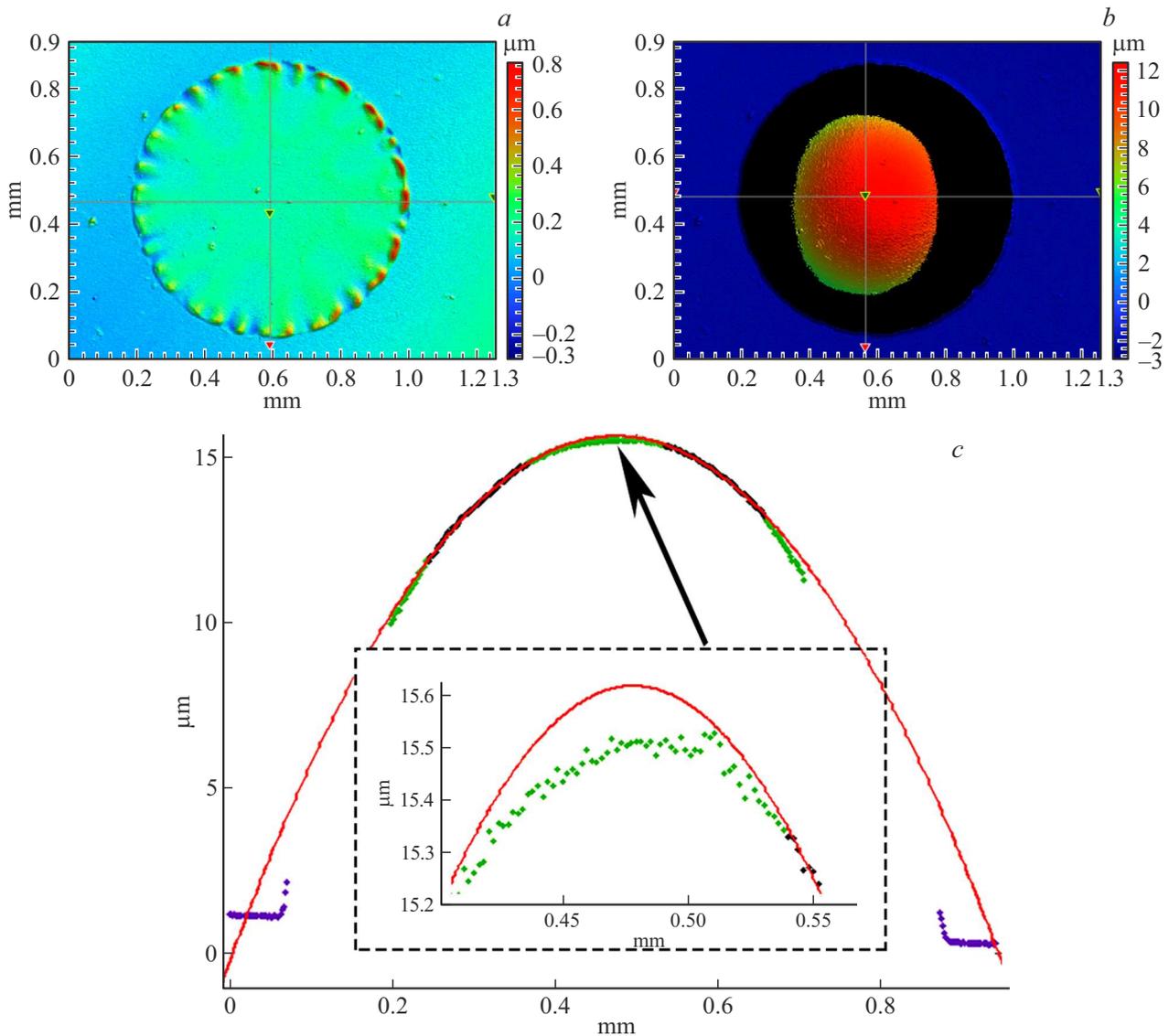


Рис. 3. Рельеф области с многослойной Al-мембраной (*a, b*) и профиль поверхности (*c*) мембраны при $P = 0$ (*a*), 1.2 atm (*b, c*). Цветовое разбиение на (*c*) — аналогично рис. 1, *c*.

— модельных данных зашумленной дуги окружности, сформированной в Matlab (рис. 6, *f*).

Также анализировались мембраны $pSi^*/SiN_x/SiO_2$ (другого диаметра и толщин слоев), мембраны $Al/SiO_2/Al$ и др., но расчетные распределения по ним не представлены в настоящей работе.

3. Методика

Исследование радиусов кривизны R по профилям поверхности (рис. 2, *b*) проводилось в Matlab с использованием Curve Fitting Tool. Разработанная программа в среде Matlab включает:

- 1) приведение начальных экспериментальных данных к виду, пригодному для обработки и анализа;
- 2) выделение профиля поверхности;

- 3) определение области расположения мембраны на этом профиле и областей для последующего подбора радиуса кривизны (областей для аппроксимации);

- 4) построение аппроксимационных кривых (представляющих собой дуги окружностей) и определение радиусов кривизны в Curve Fitting Tool. Для этого определяется радиус кривизны дуги окружности как функции $y(x)$:

$$y(x) = \sqrt{((a_1^2 - (x - b_1)^2) + d_1), \quad (1)$$

где a_1 — радиус окружности, b_1 и d_1 — смещения вершины относительно начала координат.

На первом этапе исследований оценивалось соответствие формы мембраны и аппроксимирующей экспериментальные точки дуги окружности выбранного радиуса кривизны. Вначале определялась часть профиля, относящегося к мембране и часть профиля, относящегося к подложке. На рис. 1, *c* зеленым цветом (светлые

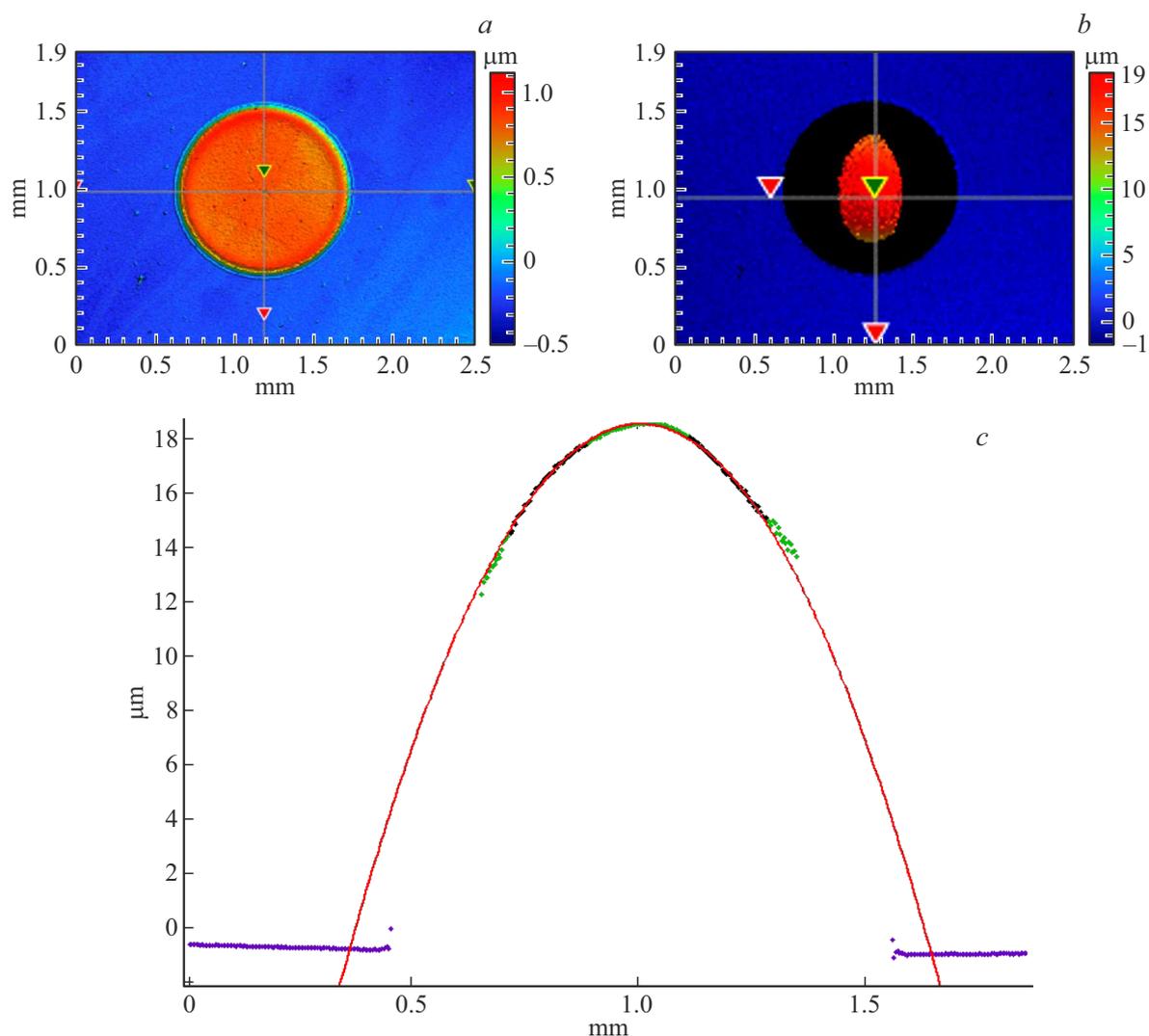


Рис. 4. Рельеф области с $pSi^*/SiN_x/SiO_2$ -мембраной (*a, b*) и профиль поверхности (*c*) мембраны при $P = 0$ (*a*), 0.6 atm (*b, c*). Цветовое разбиение на (*c*) — аналогично рис. 1, *c*.

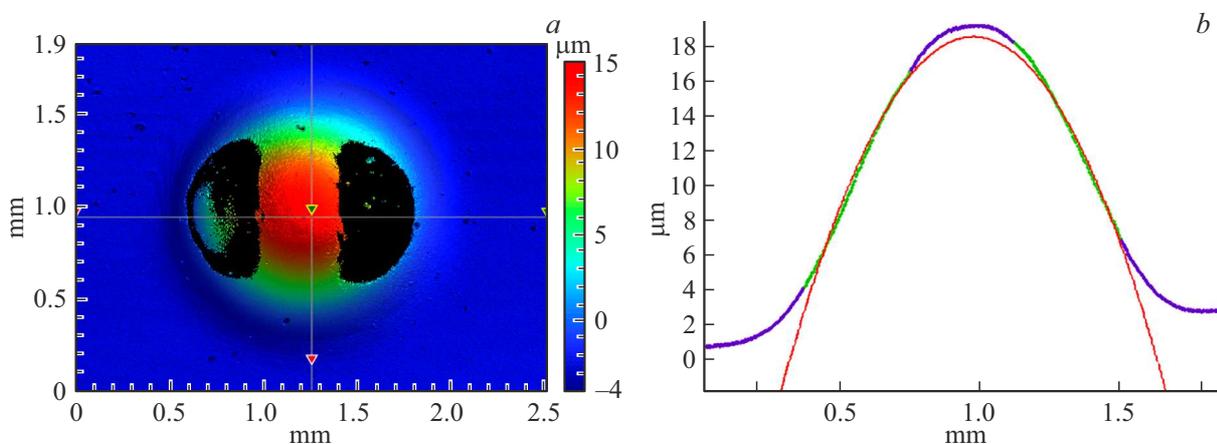


Рис. 5. Рельеф области с Si-мембраной (*a*) и профиль поверхности (*b*) мембраны при $P = 1.0 \text{ atm}$. *b* — темным фиолетовым показаны экспериментальные данные, используемая для аппроксимации область — светлым зеленым, аппроксимационная кривая — красным (светлая гладкая линия) (в онлайн версии).

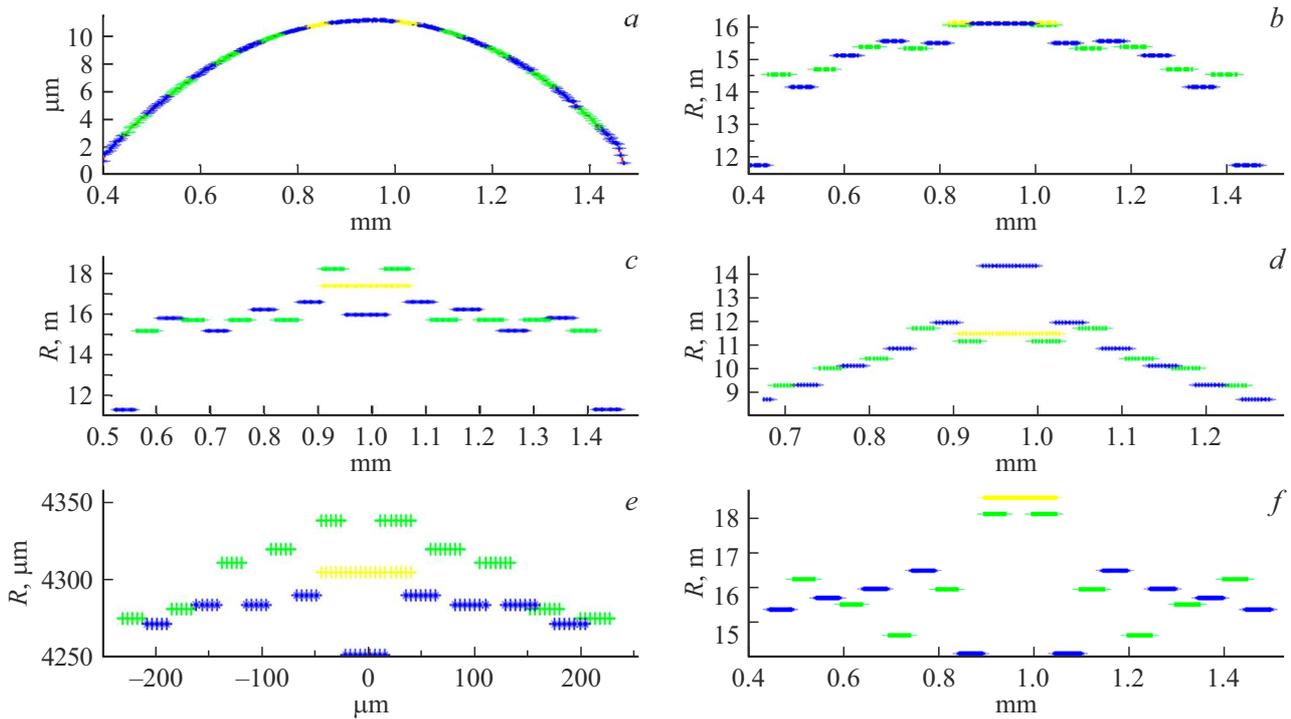


Рис. 6. Профиль мембраны Al ($0.6 \mu\text{m}$) при $P = 1.2 \text{ atm}$ с разбиением на отрезки (a) и соответствующее распределение радиуса кривизны R (b); распределения R для мембраны $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$ при $P = 0.3 \text{ atm}$ (c), 0.5 atm (d); распределение R для мембраны из Comsol (e); распределение R для зашумленных модельных данных дуги окружности (f). Для наглядности соседние отрезки показаны разным цветом.

точки) (в онлайн версии) показан профиль мембраны, фиолетовым цветом (в онлайн версии) — профиль поверхности подложки. Затем выделялась боковая поверхность мембраны — без областей ближе к центру (вершине) мембраны и ближе к закреплению (на рис. 1, c эта область показана черным). После этого проводился подбор аппроксимационной кривой для обоих случаев — как по всей поверхности мембраны (более светлой зеленой области), так и по части боковой поверхности (темной черной области). Впоследствии для анализа в основном использованы результаты аппроксимации по части боковой поверхности. Определялся радиус кривизны R и оценивалось несоответствие экспериментальных данных и аппроксимационной кривой (рис. 1, c — область края мембраны и врезка).

На втором этапе исследований анализировалось распределение R , для чего данные о боковой поверхности мембраны разделялись на несколько пар отрезков одинаковой длины (рис. 6, a), подбирались аппроксимационные кривые (своя дуга окружности для каждой пары отрезков), рассчитывался радиус кривизны R для каждой пары. Пара отрезков использовалась в связи с необходимостью наличия данных с двух сторон от вершины мембраны для качественной аппроксимации. На рис. 6 для наглядности соседние отрезки показаны разным цветом (более светлым — зеленым и более темным — синим (в онлайн версии)). При этом в области вершины мембраны в связи с ограничениями

методики расчета также приведены данные по отрезку, включающему в себя три центральных отрезка. По этому объединенному отрезку также проводилась аппроксимация; соответствующее значение рассчитанного радиуса кривизны показано наиболее светлым (желтым (в онлайн версии)). Т.е. в области вершины мембраны стоит ориентироваться именно на эту величину рассчитанного радиуса кривизны R .

4. Результаты расчета по экспериментальным данным

На рис. 1, c приведены: подобранная аппроксимационная кривая с радиусом кривизны 14.96 m и экспериментальный профиль для мембраны Al ($0.6 \mu\text{m}$) при $P = 1.2 \text{ atm}$. Можно видеть, что эти кривые не идеально соответствуют друг другу: присутствует расхождение в области закрепления мембраны (ближе к подложке), а также в области ближе к центру мембраны (увеличенное изображение приведено на врезке на рис. 1, c). На рис. 6, b показано соответствующее распределение радиуса кривизны R для этой мембраны. Видно, что радиус кривизны R имеет тенденцию к увеличению по мере приближения к центру (вершине) мембраны.

Исследование изменения радиуса кривизны $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$ мембран проводилось на серии сформированных экспериментальных данных: в диапазоне изменения поданного давления от 0.05 до 1.0 atm .

На рис. 2, *c, d* показаны аппроксимационная кривая и экспериментальный профиль при $P = 0.1 \text{ atm}$. (рис. 2, *c*, радиус кривизны 30.3 м) и $P = 0.5 \text{ atm}$ (рис. 2, *d*, радиус кривизны 9.9 м). Можно видеть расхождение этих кривых в области ближе к закреплению мембраны в обоих случаях, а при более высоком давлении — и в области ближе к центру мембраны (при повышении давления ситуация сохраняется). На рис. 2, *e* показана зависимость радиуса кривизны R по мере увеличения подаваемого избыточного давления. Как и следовало ожидать, он постепенно уменьшается. На рис. 6, *c, d* приведены распределения радиуса кривизны R при давлениях $P = 0.3$ (рис. 6, *c*), и 0.5 atm (рис. 6, *d*); наблюдается тенденция к увеличению радиуса кривизны по мере приближения к центру мембраны.

На рис. 3, *c* приведены данные для многослойной Al мембраны при $P = 1.2 \text{ atm}$, рассчитанный радиус кривизны R составил 7.1 м. Также наблюдается существенное расхождение в области закрепления мембраны и небольшое расхождение ближе к центру мембраны.

На рис. 4, *c* приведены данные для $p\text{Si}^*/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ мембраны при $P = 0.6 \text{ atm}$, рассчитанный радиус кривизны R составил 10.6 м. Наблюдается существенное расхождение в области закрепления мембраны, ближе к центру мембраны кривые совпадают.

На рис. 5, *b* приведены кривые для Si мембраны при $P = 1.0 \text{ atm}$, рассчитанный радиус кривизны R составил 11.8 м. Видно, что на форму профиля оказывает существенное влияние факт состава данной мембраны исключительно из Si (отсутствует резкий переход в области закрепления, что предположительно вызвано особенностями исполнения закрепления, недотравом и др.). Эти данные приведены в основном для сравнения с особенностями остальных мембран.

Определяемые в ПО Vision по профилям поверхности радиусы кривизны соответствуют рассчитанным по описанной методике, что свидетельствует о корректности ее работы.

Описанные результаты приведены для случая проведения аппроксимации по боковой поверхности мембраны (темной черной области; исключение — анализ Si-мембраны, где также использовалась боковая поверхность, но на рис. 5, *b* она показана светлым зеленым (в онлайн версии)). Однако стоит принять во внимание, что указанные расхождения (как в области закрепления, так и ближе к центру мембраны) присутствовали и в случае проведения аппроксимации по зеленой области (содержащей мембрану целиком, в том числе ее вершину).

Отдельно следует отметить, что в ряде случаев при анализе профилей мембран, особенно в случае наличия существенной величины начального прогиба (порядка $10 \mu\text{m}$ и более) и/или складок на мембранах — непосредственно по форме мембраны под давлением или по профилям мембраны можно было визуально наблюдать более плоскую область или область с небольшими складками в центре мембраны. Этот эффект наблюдался на мембранах с такой структурой, как Al/SiO₂/Al, Be/SiO₂/Si, некоторых изготовленных различными способами Al-мембранах и др.

5. Результаты расчета по модельным данным

При проведении расчетов по полученным в Comsol данным наблюдалось практически идеальное соответствие формы модельных данных и рассчитанной аппроксимационной кривой (анализировался только центр мембраны), радиус кривизны $4266 \mu\text{m}$. При анализе зависимости изменения радиуса кривизны R также замечена слабая тенденция увеличения R по мере приближения к центру мембраны (рис. 6, *e*).

Поскольку для всех проанализированных мембран было получено, что радиус кривизны имеет тенденцию к увеличению по мере приближения к вершине мембраны, для оценки корректности работы методики расчета были приведены вычисления на модельном распределении дуги окружности. Для этого в соответствии с выражением (1) формировался набор данных, соответствующий исследуемым мембранам в части соотношения радиуса кривизны и высоты анализируемого сегмента, а также по порядку значения радиуса кривизны: $a_1 = 15.692 \mu\text{m}$ (радиус окружности для профиля).

При расчете на идеальном наборе данных (строго по выражению (1)) для всех отрезков разбиения радиус кривизны составил $15.69 \mu\text{m}$ (соответствовал заданному).

Затем для лучшего приближения модельного распределения к реальным экспериментальным данным — на модельное распределение были дополнительно наложены зашумление, линейный наклон, изменение положения вершины. В этом случае при расчете распределения радиуса кривизны был получен рис. 6, *f*. По этому рисунку можно сделать вывод, что какого-либо явного увеличения или уменьшения радиуса кривизны по мере приближения к вершине по этим данным не наблюдается. Исключение — расчет по самой вершине, что может быть следствием ограничений методики расчета. Однако, поскольку эффект увеличения радиуса кривизны ранее наблюдался не только в непосредственной близости к центру мембраны, вероятно, он все же является фактом, а не следствием ограничений методики.

6. Обобщение

При исследовании мембран было обнаружено следующее:

— На всех экспериментально полученных данных по мембранам присутствует расхождение ближе к области закрепления мембраны (по ее периметру, на границе с подложкой), т.е. особенности напряженно-деформированного состояния в этой области следует анализировать, учитывая это несоответствие формы. Конкретное численное значение расхождения можно оценить по приведенным изображениям.

— На разных мембранах наблюдается различный эффект: в одних случаях в области своей вершины мембрана имеет немного отличный от основной части

мембраны радиус кривизны R (является более плоской), в других — нет (кривые идеально совпадают). В подавляющем большинстве случаев этот более плоский участок присутствует; он может наблюдаться и непосредственно на самом профиле поверхности в программном обеспечении Vision (в области вершины мембраны), в том числе как участок с небольшими складками.

— При анализе распределений радиуса кривизны R получено, что R имеет тенденцию к увеличению по мере приближения к центру мембраны (вершине). На тестовом массиве дуги окружности данных такая тенденция не обнаружена.

— По полученным данным можно сделать вывод, что наиболее близкой к сфере мембрана является по ее боковой поверхности.

Заключение

Разработана методика оценки степени сферичности реальной формы сформированных Bosch-процессом круглых тонкопленочных мембран при ее изменении в процессе реализации метода выдувания на основе исследования профилей поверхности мембран. Апробация методики проведена на различных мембранах: $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$, $\text{pSi}^*/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$, Al и др.

На всех проанализированных мембранах получено, что форма мембраны в наибольшей степени отличается от сферической ближе к области закрепления, на многих мембранах — также и в области вершины (центра) мембраны (рис. 1, *c*; 2, *d*; 3, *c*). Также наблюдается тенденция увеличения радиуса кривизны по мере приближения к центру мембраны.

Финансирование работы

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП „МСТ и ЭКБ“ (МИЭТ) при финансовой поддержке Минобрнауки России (№ 075-03-2020-216, 0719-2020-0017, мнемокод FSMR-2020-0017).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.А. Дедкова, П.Ю. Глаголев, Е.Э. Гусев, Н.А. Дюжев, В.Ю. Киреев, С.А. Лычев, Д.А. Товарнов. *ЖТФ*, **91** (10), 1454 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2022.08.52793.86-22
- [2] Н.А. Дюжев, Е.Э. Гусев, А.А. Дедкова, Д.А. Товарнов, М.А. Махиборода. *ЖТФ*, **90** (11), 1838 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2022.08.52793.86-22
[N.A. Djuzhev, E.E. Gusev, A.A. Dedkova, D.A. Tovarnov, M.A. Makhaboroda. *Tech. Phys.*, **65** (11), 1755 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220110055]
- [3] А.А. Дедкова, Н.А. Дюжев, Е.Э. Гусев, М.Ю. Штерн. *Дефектоскопия*, **5** (5), 52 (2020). DOI: 10.31857/S0130308220050073 [A.A. Dedkova, N.A. Dyuzhev, E.E. Gusev, M.Yu. Shtern. *Rus. J. Nondestructive Testing*, **56** (5), 452 (2020). DOI: 10.1134/S1061830920050046]
- [4] В.Ю. Киреев. *Нанотехнологии в микроэлектронике. Нанолитография — процессы и оборудование* (Издательство „Интеллект“, Долгопрудный, 2016)
- [5] A. Nazarov, I. Abdulhalim. *Sensors and Actuators A: Phys.*, **257**, 113 (2017). DOI: 10.1016/j.sna.2017.02.020
- [6] C. Zorman. *Material Aspects of Micro- and Nanoelectromechanical Systems* (Springer Handbook of Nanotechnology, Springer-Verlag, Berlin 2007)
- [7] F. Zhao. *Proceedings Modeling, Signal Processing, and Control for Smart Structures*, **6926**, 69260W (2008). DOI: 10.1117/12.775511
- [8] R.H. Plaut. *Acta Mech.*, **202**, 79 (2009). DOI: 10.1007/s00707-008-0037-3
- [9] J. Negggers, J.P.M. Hoenagels, F. Hild, S. Roux, M.G.D. Geers. *Experimental Mechanics*, **54** (5), 717 (2014). DOI: 10.1007/S11340-013-9832-4
- [10] Л.Е. Андреева. *Упругие элементы приборов* (Машгиз, М., 1962)
- [11] С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. *Пластины и оболочки* (Наука, М., 1966)
- [12] G. Machado, D. Favier, G. Chagnon. *Experimental Mechanics*, **52**, 865 (2012). DOI: 10.1007/s11340-011-9571-3
- [13] A. Degen, J. Voigt, B. Sossna, F. Shi, I.W. Rangelow. *Proceedings SPIE*, **3996**, 97 (2000).
- [14] M.K. Small, W.D. Nix. *J. Mater. Res.*, **7** (6), 1553 (1992).
- [15] А.В. Корляков. *Нано- и микросистемная техника*, **8**, 17 (2007).
- [16] О.Н. Асташенкова. *Физико-технологические основы управления механическими напряжениями в тонкопленочных композициях микромеханики*. Дисс. (СПбГЭУ „ЛЭТИ“, СПб., 2015), 143 с.
- [17] Н.М. Якупов, С.Н. Якупов. *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*, **1**, 6 (2017).
- [18] А.А. Саченков. *Цикл лекций по теории пластин и оболочек: учебное пособие* (Казанский ун-т, Казань, 2018)
- [19] М.С. Ганеева, В.Е. Моисеева, З.В. Скворцова. *Ученые записки Казанского университета. Серия физико-математические науки*, **160** (4), 670 (2018).
- [20] А.А. Дедкова, Р.Ю. Глаголев, Г.Д. Демин, Е.Э. Гусев, Р.А. Скворцов. *2020 IEEE Conf. Rus. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2288 (2020). DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039289
- [21] S. Jianbing, L. Xiang, X. Sufang, W. Wenjia. *Internat. J. Polymer Sci.*, **2017**, 4183686 (2017).
- [22] Е.Э. Гусев. *Исследование и разработка технологии создания высокопрочных мембран для преобразователей физических величин*. Дисс. (МИЭТ, М., 2019), 182 с.