

05

Методика исследования изменения формы пластин и тонкопленочных мембран с использованием геоморфометрических подходов

© А.А. Дедкова,^{1,2} И.В. Флоринский,² Н.А. Дюжев¹

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
124498 Зеленоград, Москва, Россия

² Институт математических проблем биологии РАН —
филиал Института прикладной математики им М.В. Келдыша РАН,
142290 Пущино, Московская обл., Россия
e-mail: dedkova@ckp-miet.ru, iflor@mail.ru

Поступило в Редакцию 16 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 16 апреля 2022 г.

Принято к публикации 16 апреля 2022 г.

Рассмотрена методика исследования изменения сложного рельефа и формы структур с использованием подходов геоморфометрии для изучения поверхности пластин и сформированных Bosch-процессом мембран. Проанализированы пластины до и после нанесения слоя SiO_2 , мембраны при реализации метода выдувания. Исследование изменения рельефа поверхности проведено по картам водосборной площади и главных кривизн с учетом артефактов аппроксимации экспериментальных данных. Обнаружено соответствие между распределением линий, соединяющих наивысшие области поверхности — до и после нанесения слоя SiO_2 на пластины. На мембранах со структурами $\text{Al}(0.8 \mu\text{m})/\text{SiO}_2(0.6 \mu\text{m})/\text{Al}(1.1 \mu\text{m})$, $\text{pSi}^*(0.8 \mu\text{m})/\text{SiN}_x(0.13 \mu\text{m})/\text{SiO}_2$, $\text{Al}(0.6 \mu\text{m})$ обнаружено, что особенности границы мембран обусловлены в большей степени их начальной формой, чем изменением под действием приложенной нагрузки. Показаны преимущества методов геоморфометрии для исследования изменения формы пластин и тонкопленочных мембран в технологических процессах производства микроэлектронных приборов по сравнению с традиционными методами анализа карт рельефа поверхности.

Ключевые слова: тонкие пленки, мембрана, дефект, механические характеристики, механические напряжения, деформация, прогиб, микроэлектромеханические системы, МЭМС, круглая мембрана, кремниевая подложка, оптическая профилометрия, избыточное давление, геоморфометрия, гауссова кривизна, коробление, главные кривизны, пластина, метод выдувания, цифровое моделирование рельефа, ЦМР, поверхность, рельеф.

Введение

Методики исследования изменения формы и рельефа поверхности полупроводниковых пластин и структур востребованы для микроэлектронной промышленности. Для эффективной всесторонней качественной и количественной оценки особенностей рельефа следует построить и проанализировать цифровую модель рельефа (далее — ЦМР) поверхности структур. Для исследований особенностей рельефа предлагается использовать полную систему кривизн поверхности на базе методов геоморфометрии [1,2].

Такие исследования сложной формы структур на основе ЦМР необходимы в различных сферах:

1. В микроэлектронном производстве при проведении технологических процессов по обработке пластин с целью формирования из них микроэлектронных приборов и систем наблюдается коробление (изменение плоскостности) пластин, механические напряжения и деформации. Указанные напряжения и деформации снижают надежность микроэлектронных приборов и систем, а коробление пластин вызывает проблемы с их прижи-

мом и транспортировкой в технологическом оборудовании. Подробное изучение процесса коробления пластин вызвано растущими требованиями к характеристикам структур и потребностью обеспечения достаточной для их функционирования прочности. Неравномерные напряжения и деформации, существенное влияние способа и области крепления пластин, влияние гравитации [3] — становится гораздо более выраженными для пластин диаметром 300 mm [4], для утоненных пластин [5], в том числе при создании сборок пластин [6]. Отдельно следует отметить, что при уменьшении толщины пластин начинает наблюдаться асимметричный (цилиндрический, седловидный) изгиб [4,7,8], этот процесс в настоящее время слабо изучен. Для уменьшения коробления пластин может быть использована термообработка, нанесение пленки на обратную сторону пластины [7], формирование компенсирующих структур на обратной стороне пластины [7], управление толщиной и механическими напряжениями слоев и др. [9]. Для понимания процесса коробления и борьбы с его последствиями необходима исчерпывающая информация об особенностях изменения рельефа поверхности.

2. В рентгеновской оптике, для создания отражательных элементов — асферических поверхностей [10–18]. Одной из важнейших характеристик, определяющих разрешение и светосилу рентгеновских зеркал, служит точность формы изготовленной поверхности [16]. Применение асферических поверхностей осложнено трудностями их изготовления и контроля в связи с непостоянством радиуса кривизны детали. В работе [18] подробно описана методика асферизации поверхности, приведены экспериментальные и расчетные профили отклонения поверхности от сферы, карта отклонения формы поверхности. Однако в подобных работах не используется полная система кривизн поверхности, которая могла бы позволить значительно улучшить контроль формы поверхности и анализировать ее изменения.

3. В машиностроении. При формообразовании поверхностей деталей распространены анализ и классификация форм поверхности. Для успешного решения задач оптимизации обработки сложных деталей на станках с числовым программным управлением при разработке технологического процесса требуется представление и параметризации поверхностей свободной формы [19–21].

4. При подробном исследовании рельефа поверхности и формы МЭМС-структур и изделий на их основе: акселерометров [22], сенсоров давления [23], адаптивной оптики [24,25] и др. Здесь необходимо анализировать и начальную форму МЭМС, и ее изменение, как под действием ожидаемых функционально необходимых воздействий [25], так и под действием различных разрушающих факторов [26].

Настоящая работа посвящена разработке и использованию основанной на методах геоморфометрии методики, предназначенной для исследования изменения сложной формы пластин и тонкопленочных мембран, формируемых в технологических процессах микроэлектронного производства.

Описанная методика предназначена для более подробного исследования особенностей рельефа поверхности по сравнению со стандартными методиками анализа карт рельефа. Методика позволяет различать разнообразные слабовыраженные особенности рельефа, что позволит в последующем делать выводы о тех или иных технологических процессах и свойствах формирующихся структур.

1. Методы геоморфометрии

Геоморфометрия — научная дисциплина, предметом которой является математическое моделирование и анализ рельефа, а также взаимосвязей между ним и другими компонентами геосистем. В настоящее время геоморфометрия широко используется для решения задач геоморфологии, гидрологии, почвоведения, геоботаники, геологии, гляциологии, океанологии, климатологии и других наук о Земле [1].

Морфометрической величиной называют однозначную функцию двух переменных, описывающую свойства то-

пографической поверхности. Перечень используемых в геоморфометрии величин, которые рассчитываются по ЦМР, включает, в частности, следующие 12 кривизн, которые составляют полную систему кривизн [1,2]: горизонтальная кривизна, вертикальная кривизна, разностная кривизна, избыточная горизонтальная кривизна, избыточная вертикальная кривизна, аккумуляционная кривизна, кольцевая кривизна, минимальная кривизна, максимальная кривизна, средняя кривизна, гауссова кривизна, несферичность. Их формулы и краткие интерпретации приведены в [1,2,30]. Каждая из этих величин имеет свой физико-математический смысл, описывающий ту или иную особенность локальной геометрии поверхности. Под полной системой кривизн понимается математическая полнота системы величин. Всеобъемлющая характеристика особенностей рельефа того или иного объекта возможна лишь при использовании цифровых моделей всех этих 12-ти величин, рассчитанных по ЦМР [1]. Данным списком перечень морфометрических величин не ограничивается, он включает в себя также водосборную площадь, экспозицию склона (ориентацию), крутизну склона и др. [1].

2. Оборудование и расчеты

Для формирования цифровых моделей рельефа использовался оптический профилометр Veeco Wyko NT 9300, формирующий ЦМР структур диаметром до 200 мм, с разрешением от 98 нм до 57 мкм. При анализе пластин разрешение уменьшали до ~ 0.5 мкм. При анализе мембран размер матрицы ЦМР составлял 640 × 480, разрешение ~ 4 мкм.

Для расчетов морфометрических величин использовался универсальный спектрально-аналитический метод с использованием полиномов Чебышева и суммирования Фейера [31]. Метод предназначен для обработки регулярных ЦМР в рамках единой схемы, включающей глобальную аппроксимацию ЦМР, генерализацию и подавление шума в ЦМР, а также расчет морфометрических характеристик на основе аналитического вычисления частных производных. Аппроксимация характеризуется монотонной сходимостью и возможностью быстрого глубокого разложения функции высоты (до 7000 коэффициентов разложения n ; общее количество коэффициентов разложения равно n^2 , так как функция раскладывается на одинаковое количество коэффициентов разложения по двум плановым координатам).

Морфометрические величины обычно характеризуются широким динамическим диапазоном значений. Чтобы избежать потерь информации об их пространственном распределении, для отображения применяют логарифмическое трансформирование следующего вида [1,30]:

$$\tilde{\Upsilon} = \text{sign}(\Upsilon) \ln(1 + 10^{\tilde{n}|\Upsilon|}), \quad (1)$$

где $\tilde{\Upsilon}$ и Υ — трансформированное и исходное значения морфометрической величины соответственно; $\tilde{n} = 0$ для

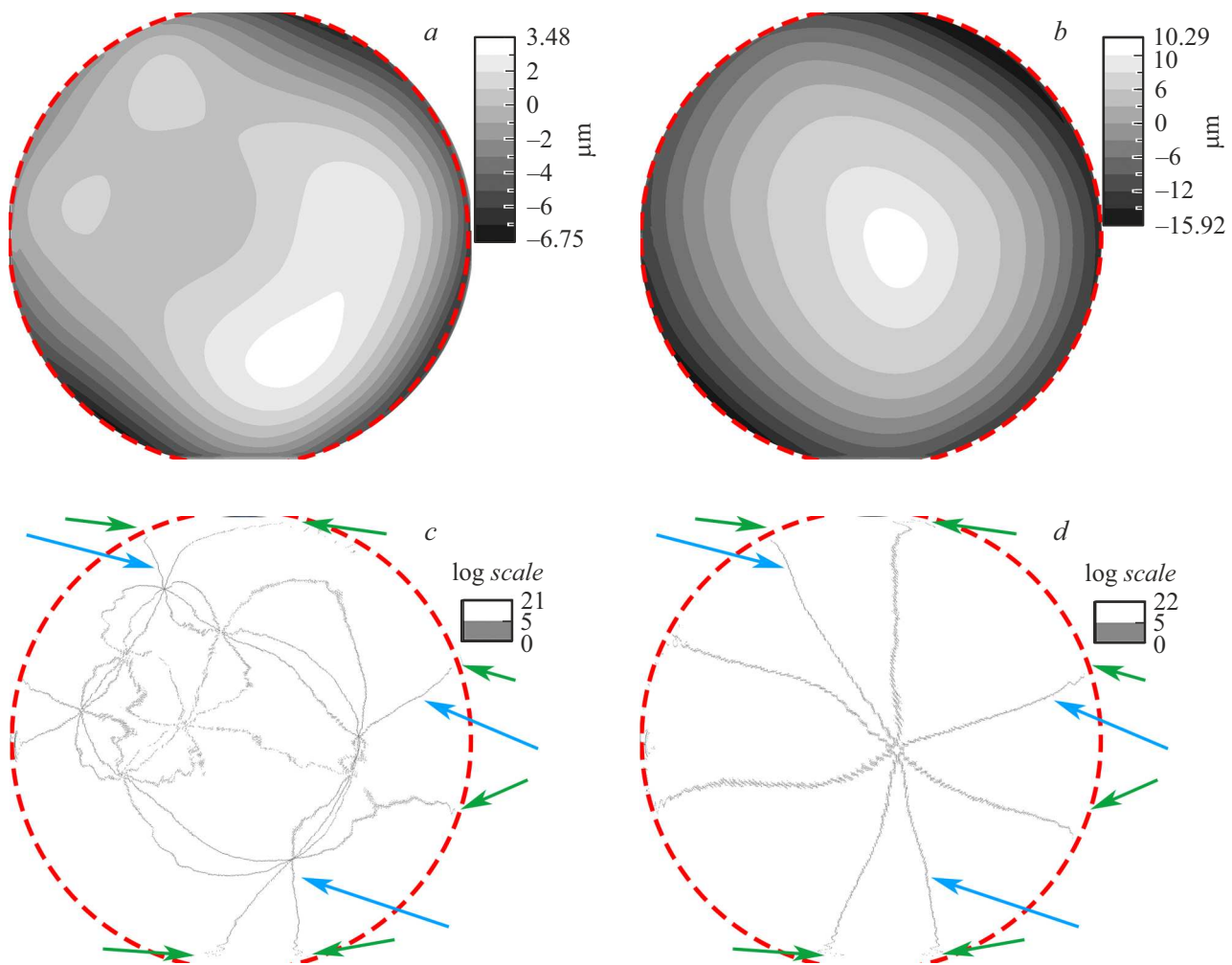


Рис. 1. Образец № 1: рельеф поверхности до (a) и после (b) формирования слоя SiO_2 , водосборная площадь (бинарная карта) до (c) и после (d) формирования слоя SiO_2 .

нелокальных величин, $\hat{n} = 2, \dots, 9$ для локальных величин; $\hat{m} = 2$ для K, K_a и K_r , $\hat{m} = 1$ для других величин. Выбор значения \hat{n} зависит от шага сетки ЦМР.

3. Образцы

Для демонстрации возможности исследования пластины с нанесенными (осажденными) пленками по картам водосборной площади использовались кремниевые (Si) пластины диаметром 100 mm (рис. 1, 2). На этих пластинах проводилось формирование оксида кремния (SiO_2) толщиной $0.6 \mu\text{m}$ (установка PlasmalabSystem 100 (Oxford), $T = 100^\circ\text{C}$, RF-генератор 150 W, ICP 300 W, N_2O $80 \text{ cm}^3/\text{min}$, SiH_4 $34 \text{ cm}^3/\text{min}$, $P = 4 \text{ mTorr}$, $t = 20 \text{ min}$).

Для демонстрации анализа МЭМС-структур исследовались сформированные Bosch-процессом [32–34] тонкопленочные мембраны (рис. 3–6). Мембраны создавались из предварительно сформированных на лицевой стороне кремниевой пластины тонких пленок, после глубокого

сквозного анизотропного травления кремния с обратной стороны пластины в Bosch-процессе до пленки (рис. 3). В процессе исследований были проанализированы различные мембраны, наиболее типичные и наглядные случаи представлены на рис. 3–6:

- изначально натянутая мембрана с небольшим начальным прогибом w — около $3 \mu\text{m}$ (рис. 3, 4), структура $\text{pSi}^*(0.8 \mu\text{m})/\text{SiN}_x(0.13 \mu\text{m})/\text{SiO}_2(0.5 \mu\text{m})$;
- мембрана с небольшими складками и начальным прогибом w менее $1 \mu\text{m}$ (рис. 5), структура: 20 слоев Al суммарной толщиной $0.6 \mu\text{m}$ с использованием ионной бомбардировки после осаждения каждого слоя;
- мембрана с существенными складками и начальным прогибом w более $30 \mu\text{m}$ (рис. 6), структура $\text{Al}(0.8 \mu\text{m})/\text{SiO}_2(0.6 \mu\text{m})/\text{Al}(1.1 \mu\text{m})$.

Мембраны исследовались при реализации метода выдувания. Данный метод используется для определения механических характеристик пленок и структур. Метод заключается в фиксации краев мембраны по периметру, подаче на нее с одной стороны (одностороннего) избыточного давления, анализе зависимости

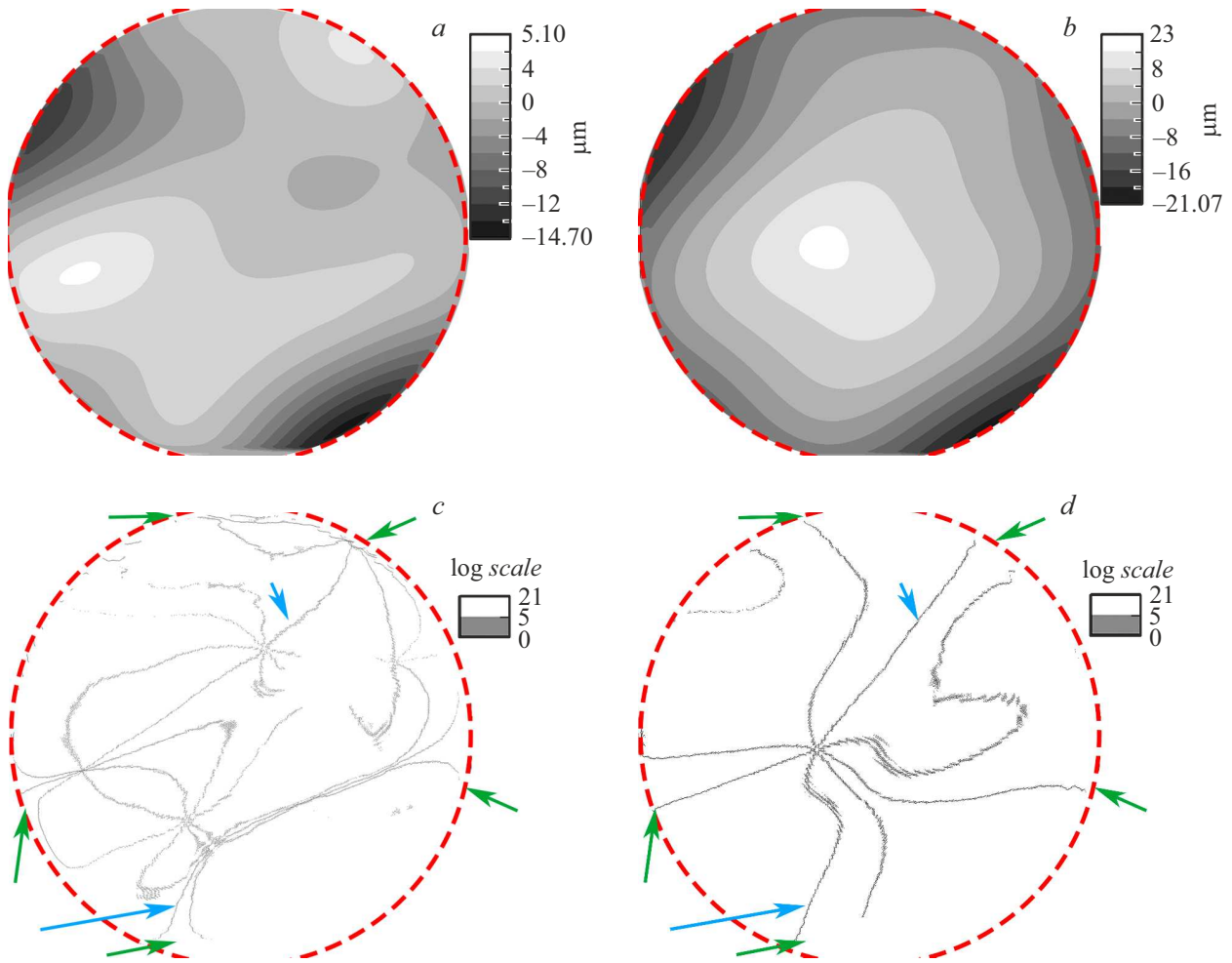


Рис. 2. Образец № 2: рельеф поверхности до (a) и после (b) формирования слоя SiO₂, водосборная площадь (бинарная карта) до (c) и после (d) формирования слоя SiO₂.

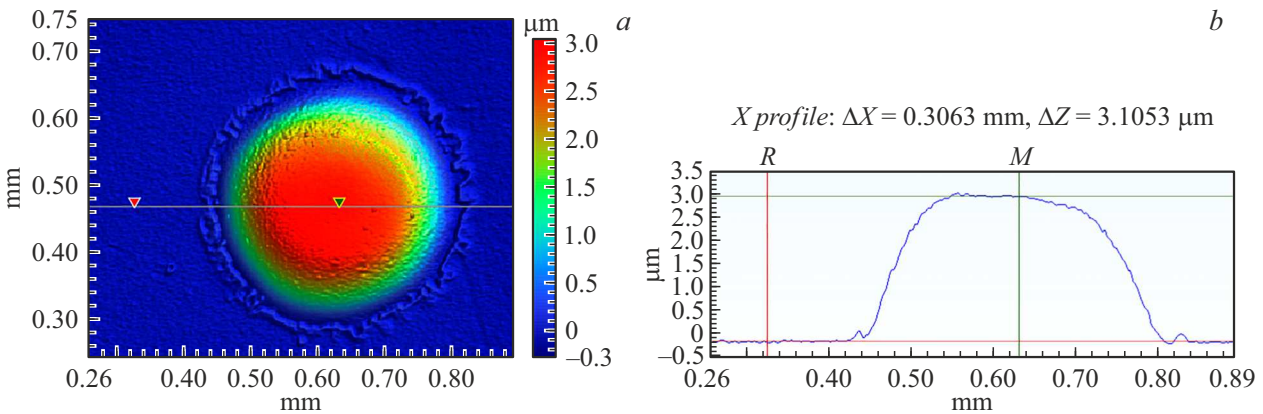


Рис. 3. Изначальная форма мембраны pSi*(0.8 μm)/Si_x(0.13 μm)/SiO₂(0.5 μm): a — рельеф поверхности (ЦМР), b — профиль поверхности вдоль проведенной линии. На картах поверхности здесь и далее цветовая шкала от синего (наименьшие значения) до красного (наибольшие значения) (в онлайн версии).

величины прогиба мембраны от значения приложенного избыточного давления, расчете модуля упругости или других величин [35–39]. Поскольку сформированные Bosch-процессом мембраны отличаются наличием на-

чального прогиба и сложной формой еще до подачи избыточного давления, исследование их напряженно-деформированного состояния требует подробного рассмотрения [32,33].

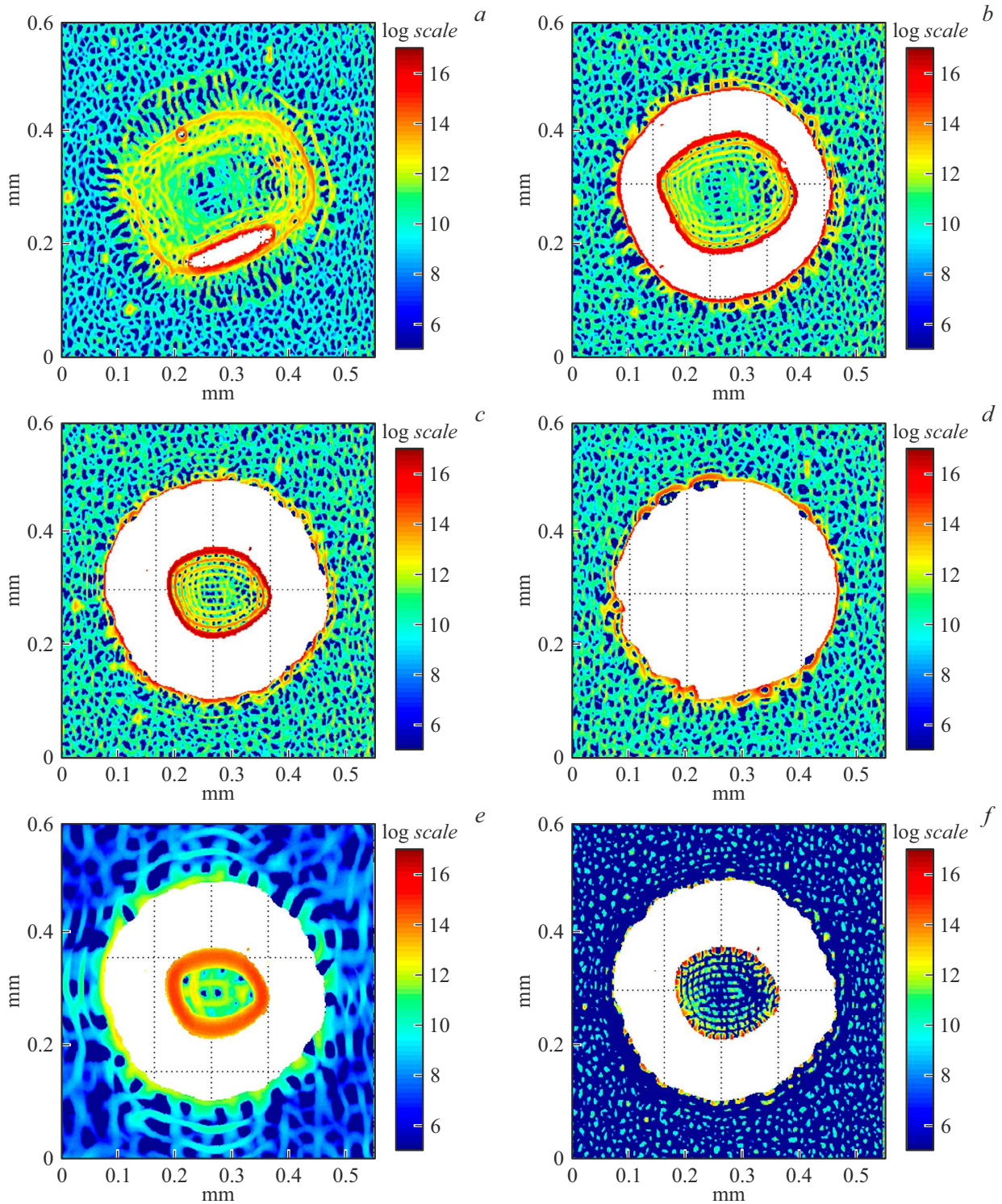


Рис. 4. Мембрана $\text{pSi}^*(0.8\ \mu\text{m})/\text{SiN}_x(0.13\ \mu\text{m})/\text{SiO}_2(0.5\ \mu\text{m})$: *a* — k_{\max} ($P = 0$, небольшое пережатие; $w = 4.1\ \mu\text{m}$), *b* — k_{\max} ($P = 0.8\ \text{atm}$; $w = 6.8\ \mu\text{m}$), *c* — k_{\max} ($P = 3.6\ \text{atm}$; $w = 10.6\ \mu\text{m}$), *d* — k_{\max} (после отрыва), *e* — k_{\max} ($P = 3.6\ \text{atm}$; $w = 10.6\ \mu\text{m}$), *f* — k_{\min} ($P = 3.6\ \text{atm}$; $w = 10.6\ \mu\text{m}$). При аппроксимации $n = 300$ (*a-d,f*), $n = 100$ (*e*).

4. Исследование изменения формы пластин с пленками

Ранее авторами подробно описывались исследования особенностей локальной формы пластин с пленками

с использованием гауссовой, средней и главных кривизн [27–29]. Для исследования процесса изменения формы пластин при формировании на их поверхности пленок различных материалов также полезно использовать и другие морфометрические величины.

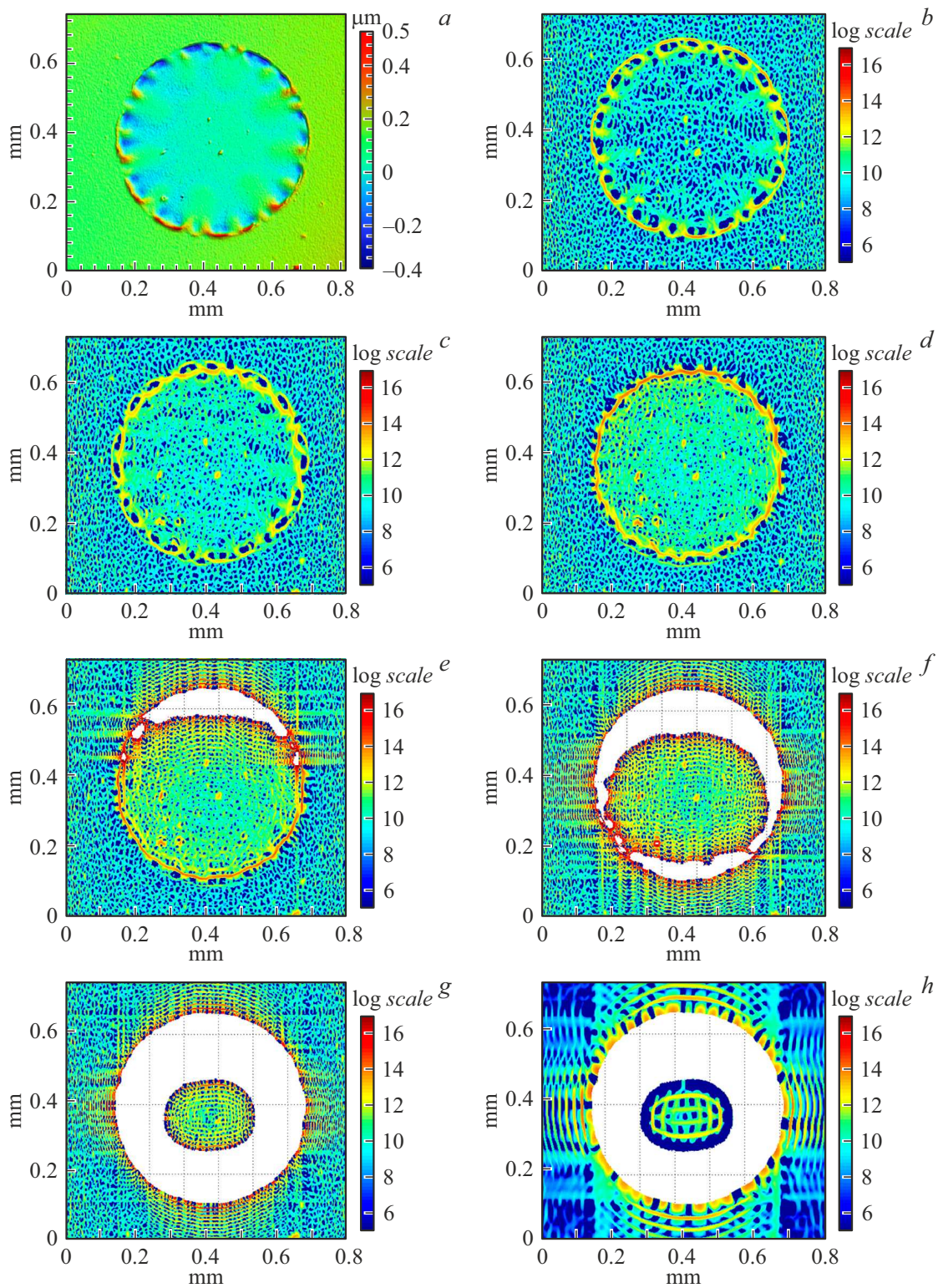


Рис. 5. Мембрана Al ($0.6 \mu\text{m}$): *a* — рельеф ($P = 0 \text{ atm}$; $w = -0.13 \mu\text{m}$), *b* — k_{max} ($P = 0 \text{ atm}$; $w = -0.13 \mu\text{m}$), *c* — k_{max} ($P = 0.3 \text{ atm}$; $w = 1.8 \mu\text{m}$), *d* — k_{max} ($P = 0.6 \text{ atm}$; $w = 3.9 \mu\text{m}$), *e* — k_{max} ($P = 0.9 \text{ atm}$; $w = 5.9 \mu\text{m}$), *f* — k_{max} ($P = 1.2 \text{ atm}$; $w = 7.6 \mu\text{m}$), *g, h* — k_{max} ($P = 2.5 \text{ atm}$; $w = 13.8 \mu\text{m}$). При аппроксимации $n = 300$ (*b-g*), $n = 100$ (*h*).

До проведения технологических процессов исходные поверхности кремниевых пластин со средней стандартной толщиной $650 \mu\text{m}$ можно считать достаточно плос-

кими, так как прогиб обычно не превышает единиц микрон. Нанесение функционального слоя (пленки) на поверхность пластины приводит к искривлению сформир-

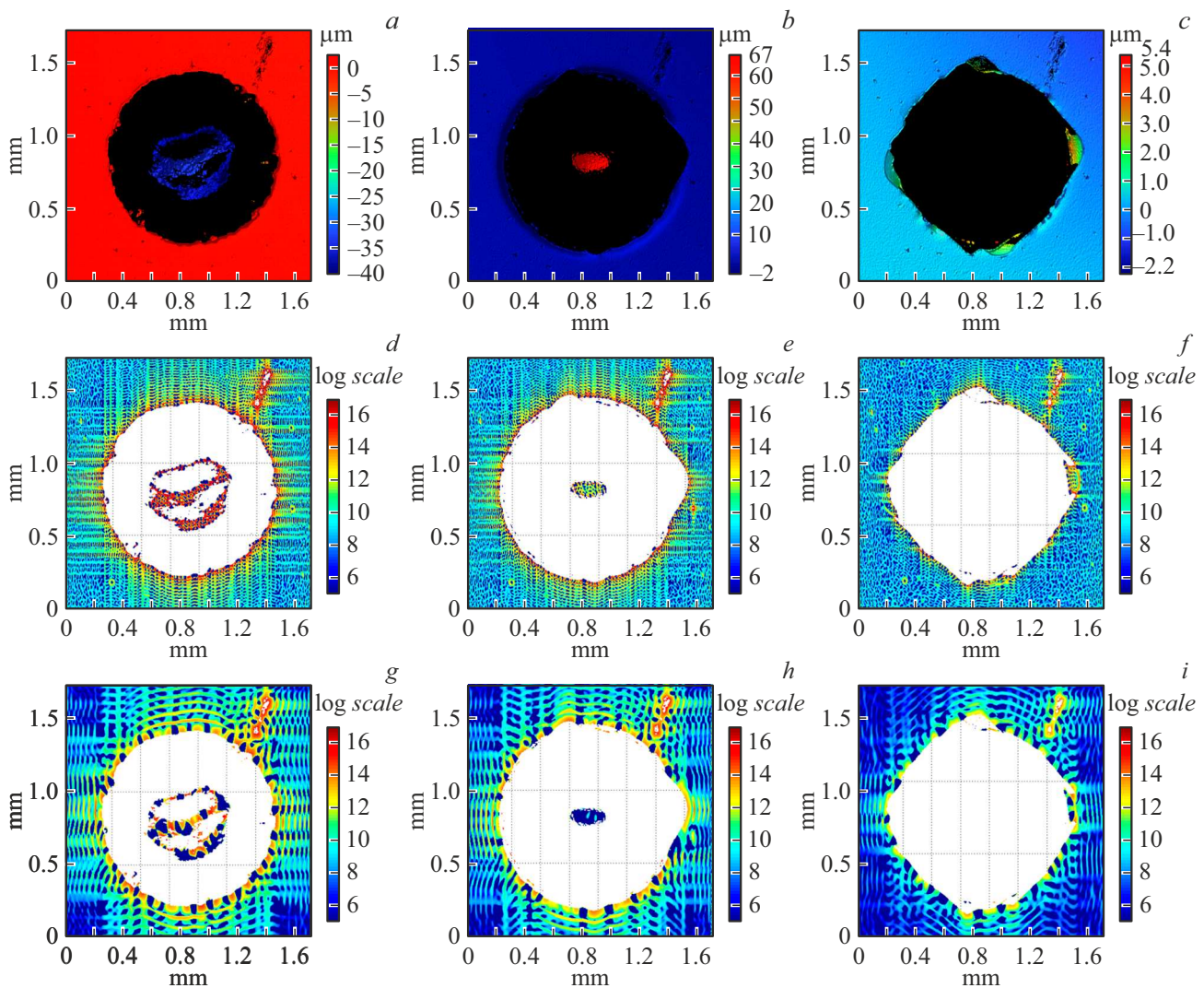


Рис. 6. Мембрана $\text{Al}(0.8\ \mu\text{m})/\text{SiO}_2(0.6\ \mu\text{m})/\text{Al}(1.1\ \mu\text{m})$: *a-c* — рельеф; *d-f* — k_{\max} ($n = 300$); *g-i* — k_{\max} ($n = 100$). Показаны: *a, d, g* — изначальная мембрана ($P = 0\ \text{atm}$; $w = -40\ \mu\text{m}$); *b, e, h* — нагруженная мембрана ($P = 2.8\ \text{atm}$; $w = 66\ \mu\text{m}$); *c, f, i* — после отрыва мембраны.

рованной структуры „подложка и слой“, форма которой часто близка к сферической [40]. Реально исходная форма кремниевых пластин сложная, что оказывает влияние и на форму сформированной структуры „Si-пластина и слой“.

На рис. 1, 2 представлены данные о двух Si-пластинах диаметром 100 мм с SiO_2 толщиной $0.6\ \mu\text{m}$ до и после формирования слоя. Толщина слоев контролировалась на спектральном эллипсометре Horiba Uvisel 2.

Несмотря на относительно близкую к сферическому сегменту форму пластин с пленками (рис. 1, *b* и 2, *b*), они содержат паттерны (особенности рельефа, укладываемые в схему-образ), взаимосвязанные с паттернами исходной ЦМР до нанесения слоя (рис. 1, *a* и 2, *a*). В частности, коррелирует распределение наивысших областей поверхности — аналога „хребтов“ или „гребней“. Такие распределения удобно анализировать по картам водосборной площади. Для данных структур они

представлены на рис. 1, *c, d* и 2, *c, d*. Расчет проводился на основе одного из алгоритмов маршрутизации потоков — метода Мартца-Де Янга [30]. Водосборная площадь представляет собой площадь замкнутой фигуры, сформированной отрезком горизонтали (который включает данную точку) и двумя линиями тока, приходящими с вышележащей точки. Поскольку вышележащих областей наименьшее количество именно на „хребтах“, это приводит к тому, что наименьшие значения водосборной площади визуализируют их расположение (что наиболее четко проявляется при построении бинарной карты).

Положение линий „хребтов“ до и после нанесения слоя согласуется: положение линий ближе к краю пластины по большей части совпадает, а в ряде случаев соотносится и положение линий по основной площади пластины (показано стрелками на рис. 1, *c, d* и 2, *c, d*). Подобный эффект наблюдается и при анализе карт ориентации склонов, максимальной кривизны и др.

Таким образом, показано использование методики анализа особенностей рельефа с применением методов геоморфометрии для исследования структур, а именно для определения расположения линий, соединяющих наивысшие точки поверхности. Эта информация может быть полезна для понимания механизма деформации пластины и прогнозирования ее реальной формы после проведенных технологических процессов.

Также показано, что исследование особенностей рельефа пластин со сформированными на их поверхности пленками с помощью методики анализа на основе методов геоморфометрии в отличие от стандартных методов анализа ЦМР (при анализе только карт рельефа, полученного методом оптической профилометрии или другим методом) дает возможность определения расположения линий, соединяющих наивысшие точки поверхности. Эта информация очень важна разработчикам микроэлектронных приборов и технологам для понимания механизма деформации пластин со структурами и прогнозирования их реальной формы после проведенных технологических процессов. Изменение расположения этих линий при утонении пластин (переходе изгиба к седловидному) может позволить глубже понять процесс их коробления и контролировать его.

5. Исследование изменения формы тонкопленочных мембран

Методика исследования ЦМР малых по площади объектов, в том числе МЭМС-структур, в целом аналогична методике исследования пластин. Однако при работе с ЦМР тонкопленочных мембран, в том числе мембран, имеющих начальный прогиб, и мембран в процессе проведения испытаний по методу выдувания, есть важная особенность: факт наличия в анализируемых ЦМР областей без данных (рис. 4–6), вызванных слишком большим углом наклона этих областей [32,34].

В случае отсутствия данных в ЦМР для ее обработки обычно такие области заполняются определенными значениями (например, нулями), а затем после проведения расчетов, данные из этих областей на рассчитанных картах вновь удаляются. Этот подход работает в случае достаточно малой площади таких областей, однако при анализе ЦМР изогнутых мембран они могут составлять значительную часть ЦМР (рис. 6, b).

Другим вариантом является восстановление данных в изначально пустой области. Однако этот процесс часто трудновыполним. Не во всех случаях можно с уверенностью предсказать не определяемую экспериментально форму мембраны. При наличии предположения такое восстановление является длительным и кропотливым, при этом в связи с присутствием резкой границы между областью мембраны и подложки на картах рассчитанных морфометрических величин все равно будут присутствовать определенные артефакты, вызванные аппроксимаци-

ей или интерполяцией таких данных (аналогом явления Гиббса [41]).

По этой причине предлагается анализировать ЦМР мембран наиболее простым способом, при этом учитывая особенности, вызванные наличием областей без данных.

Наибольший интерес представляет узкая область данных — область крепления мембраны к подложке (по периметру мембраны). Ее доступная для анализа часть постепенно уменьшается по мере нагружения мембраны.

Исследовалась серия мембран $pSi^*(0.8\ \mu m)/SiN_x(0.13\ \mu m)/SiO_2(0.5\ \mu m)$ различного диаметра (диаметры отверстий в фотошаблоне от 250 до 1000 μm). После завершения испытаний (отрыва мембран) оставались как относительно ровные отверстия, оставленные разрушенными мембранами большого и среднего диаметров, выдерживающими давление до 3.7 atm, так и отверстия с рваными краями, оставленные разрушенными мембраны малого диаметра, выдерживающими давление порядка 5 atm. Также на этих структурах наблюдался „ореол“ вокруг мембран (рис. 3) — небольшое кольцо с вспученной пленкой. Этот же „ореол“ виден и на карте максимальной кривизны k_{max} (рис. 4, a). По мере увеличения поданного избыточного давления в области внутри „ореола“ увеличивается максимальная кривизна k_{max} . С увеличением поданного избыточного давления отдельные близко расположенные области с достаточно высокими значениями k_{max} сливаются в одну (рис. 4, b, c). Минимальная кривизна k_{min} также показывает локальные выпуклые (наиболее выделяющиеся) участки (рис. 4, f).

Здесь и далее стоит учитывать, что подобные области соответствуют наибольшей кривизне, т.е. выпуклым зонам, что означает наибольшее отклонение положения структуры от плоскости подложки. Это может быть следствием частичного отделения пленки от подложки, но не доказывает в явном виде наличия максимальных механических напряжений именно в этой области. После отрыва мембраны особенности распределения k_{max} соответствуют положению и форме остатков структуры (рис. 4, d).

Подобные эффекты постепенного слияния расположенных рядом областей с высокими значениями k_{max} наблюдались на мембранах различного диаметра из этой партии $pSi^*(0.8\ \mu m)/SiN_x(0.13\ \mu m)/SiO_2(0.5\ \mu m)$. Однако при анализе мембран большого диаметра на сформированном изображении область между „ореолом“ и началом отсутствия данных очень узкая (в том числе относительно диаметра мембраны), что затрудняет анализ и делает его менее эффективным. В частности, при анализе мембраны диаметром 1 mm (отрыв наступил при $P = 2.6\ atm$) существенного изменения локальной кривизны обнаружено не было. Это может быть как следствием самого отсутствия изменения локальной кривизны (что косвенно может свидетельствовать об особенностях напряженно-деформированного состояния), так и неспособности этой методики зафиксиро-

вать такие изменения. По этой причине для подобных мембран описанный подход предлагается применять при анализе структур малого диаметра.

Обнаружено, что при использовании невысокой степени полинома ($n = 100$) на рассчитанных картах k_{\max} присутствуют фрагменты концентрических окружностей (рис. 4, *e*). Более заметно это на мембранах Al ($0.6 \mu\text{m}$) (рис. 5, *h*) и Al($0.8 \mu\text{m}$)/SiO₂($0.6 \mu\text{m}$)/Al($1.1 \mu\text{m}$) (рис. 6, *g-i*). Эти артефакты (аналог явления Гиббса [41]) являются следствием особенностей процесса аппроксимации ЦМР.

Присутствие таких артефактов и их округлая форма на картах кривизн свидетельствует о близкой к кругу форме области без данных (что затем приводит к ровному отверстию после отрыва мембраны). На образце Al($0.6 \mu\text{m}$) явно видны такие концентрические окружности, и после отрыва мембраны осталось отверстие круглой формы. На образце Al($0.8 \mu\text{m}$)/SiO₂($0.6 \mu\text{m}$)/Al($1.1 \mu\text{m}$) видны подобные артефакты, однако их форма неровная — не соответствует окружности, как и сформировавшееся после отрыва мембраны отверстие.

Другим распространенным артефактом являются „полосы“ относительно высоких значений k_{\max} , наблюдаемые, напротив, в зонах отличия формы границы от идеально круглой. По этим полосам можно сделать вывод о присутствии неровностей (или дефектов) по периметру мембран (рис. 5, *e-h*, 6, *d-i*). Фактически „полосы“ являются индикатором неровности границы (часто характерным для сжатых мембран или мембран со складками). По мере нагружения мембраны близко расположенные соседние „полосы“ сливаются (рис. 6, *d, e, g-h*).

При относительно малой степени аппроксимационного полинома ($n = 100$) соответствующие карты морфометрических величин вблизи периметра мембраны отображают не столько характер рельефа в самих анализируемых локальных областях, сколько характер границы с областью без данных (рис. 4, *e*, 5, *h*, 6, *g-i*). При более высокой степени полинома ($n = 300$) такие артефакты также присутствуют, однако они менее значительны и почти не препятствуют анализу рельефа рядом с областями без данных (рис. 4, *a-d*, 5, *e-g*, 6, *d-f*).

Строит заметить, что на Al($0.6 \mu\text{m}$) и Al($0.8 \mu\text{m}$)/SiO₂($0.6 \mu\text{m}$)/Al($1.1 \mu\text{m}$) мембранах дефекты неровной границы мембраны (вызывающие „полосы“) присутствовали изначально (до подачи избыточного давления). Артефакты проявились при появлении областей без данных (рис. 5, *e*). А на различных мембранах pSi*($0.8 \mu\text{m}$)/SiN_x($0.13 \mu\text{m}$)/SiO₂($0.5 \mu\text{m}$), в связи с более ровной границей, „полосы“ почти не наблюдались, в том числе при анализе сильнонагруженных мембран.

Следовательно, основной характер границы мембраны в большей степени обусловлен ее формой у начальной мембраны (до подачи избыточного давления), нежели изменением под действием приложенной нагрузки.

Тем не менее описанная методика позволяет анализировать изменение рельефа поверхности вблизи закреп-

ления мембраны. Так, на рис. 5, *b-g* видно постепенное смещение положения наиболее высоких значений k_{\max} (до нагружения — по внешнему кругу относительно исходных неровностей по периметру мембраны, после нагружения — по внутреннему кругу). Также на рис. 4, *a* и 5, *d* видны протяженные области наименьших значений k_{\max} . Они соответствуют области локальных впадин, предположительно вызванных стягиванием мембран. В случае рис. 4, *a* это может быть следствием небольшого пережатия в держателе при закреплении на стенде. В случае рис. 5, *d* — следствием нагружения мембраны; при еще большом избыточном давлении эти области наименьшего значения k_{\max} также присутствуют, однако менее явно, в связи с вышеупомянутыми артефактами.

Таким образом, исследование особенностей рельефа мембран, сформированных пленками на поверхности кремниевых пластин, с помощью методики анализа на основе методов геоморфометрии в отличие от стандартного анализа карт рельефа дает возможность визуализации расположения выпуклых и вогнутых элементов поверхности мембран у их граничных областей и анализа степени ровности области закрепления и отрыва мембраны. Это позволяет сделать предположения об областях отделения пленки от подложки. Поскольку данные изменения достаточно слабо выражены, непосредственно на картах рельефа поверхности они практически не заметны и не могут быть обнаружены при стандартных методиках анализа.

Заключение

Описана методика анализа рельефа поверхности на базе геоморфометрических подходов, позволяющих анализировать локальные особенности поверхности структур в микроэлектронике. На примере кремниевых пластин со сформированными пленками и круглых тонкопленочных мембран показано, что эта методика позволяет получить новую информацию по сравнению со стандартными методиками анализа карт рельефа поверхности, а именно:

1. Определять расположение линий, соединяющих наивысшие точки поверхности пластин с пленками. Это позволяет выявлять закономерности наследования исходного рельефа после проведения технологических процессов.

2. Визуализировать расположение выпуклых и вогнутых элементов поверхности мембран у их граничных областей и анализировать степень ровности области закрепления и отрыва мембран. Данная методика позволяет изучать процесс изменения рельефа поверхности мембраны и близлежащих областей.

Указанная информация необходима разработчикам микроэлектронных приборов и технологам для понимания механизма деформации пластин со структурами и мембранами и прогнозирования их реальной

формы после проведенных технологических операций и процессов.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-00614. Использовалось оборудование ЦКП „МСТ и ЭКБ“ (МИЭТ).

Благодарности

Авторы выражают благодарность С. Кузьмину (НПК „Технологический центр“) за предоставленные пластины с SiO₂ на Si. Также авторы выражают благодарность В.Ю. Кирееву (АО „ЗНТЦ“) за обсуждение и ценные замечания.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] I.V. Florinsky *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology. 2nd ed.* (Elsevier/Academic Press, Amsterdam, 2016)
- [2] P.A. Shary. *Mathematical Geology*, **27** (3), 373 (1995). DOI: 10.1007/BF02084608
- [3] H. Liu, Z. Dong, R. Kang, P. Zhou, S. Gao. *Metrol. Meas. Syst.*, **XXII** (4), 531 (2015). DOI: 10.1515/mms-2015-0052
- [4] G.T. Ostrowicki, S.P. Gurum, A. Nangia. *IEEE 68th Electron. Components and Technol. Conf.*, 2110 (2018). DOI: 10.1109/ECTC.2018.00317
- [5] X. Zhu, X. Chen, H. Liu, R. Kang, B. Zhang, Z. Dong. *Mater. Res. Express*, **4**, 065904 (2017). DOI: 10.1088/2053-1591/aa71ed
- [6] Y. Kim, S.-K. Kang, S.-D. Kim, S.E. Kim. *Microelectron. Engineer.*, **89**, 46 (2012). DOI: 10.1016/j.mee.2011.01.079
- [7] D. Shi, Z. Xia, M. Hu, G. Mei, Z. Huo. *Semicond. Sci. Technol.*, **35** (4), 045031 (2020). DOI: 10.1088/1361-6641/ab73eb
- [8] G. Gadhiya, B. Brämer, S. Rzepka, T. Otto. *22nd Europ. Microelectron. Packaging Conf. & Exhibition (EMPC)*, 19265124 (2019). DOI: 10.23919/EMPC44848.2019.8951805
- [9] C. Ferrandon, B. Kholti, L. Castagne, F. Casset, R. Franiatte, D. Mermin, G. Simon, G. Imbert, S. Petitdidier, F. Bailly, P. Chevalier, L. Toffanin, N. Chevrier, J.P. Pierrel. *6th Electron. System-Integration Technol. Conf. (ESTC)*, 16520083 (2016). DOI: 10.1109/ESTC.2016.7764485
- [10] В.В. Грибко, А.С. Маркелов, В.Н. Трушин, Е.В. Чупрунов. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, **5**, 28 (2017). DOI: 10.7868/S0207352817050079 [V.V. Gribko, A.S. Markelov, V.N. Trushin, E.V. Chuprunov. *J. Surf. Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, **11** (3), 505 (2017). DOI: 10.1134/S1027451017030077]
- [11] В.В. Грибко, А.С. Маркелов, В.Н. Трушин, Е.В. Чупрунов. *Приборы и техника эксперимента*, **1**, 136 (2018). DOI: 10.7868/S0032816218010196 [V.V. Gribko, A.S. Markelov, V.N. Trushin, E.V. Chuprunov. *Instruments and Experimental Techniques*, **61** (1), 148 (2018). DOI: 10.1134/S0020441218010165]
- [12] В.В. Грибко, А.С. Маркелов, В.Н. Трушин, Е.В. Чупрунов. *Приборы и техника эксперимента*, **5**, 119 (2019). DOI: 10.1134/S0032816219040256 [V.V. Gribko, A.S. Markelov, V.N. Trushin, E.V. Chuprunov. *Instruments and Experimental Techniques*, **62** (5), 703 (2019). DOI: 10.1134/S0020441219040183]
- [13] Е.Б. Клюенков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, Н.И. Чхало. *Известия РАН. Серия физическая*, **72** (2), 205 (2008). [E.B. Klyuenkov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, N.I. Chkhalo. *Bull. Russ. Academy of Sciences: Physics*, **72** (2), 188 (2008).]
- [14] Н.Н. Салашенко, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало. *Известия РАН. Серия физическая*, **74** (1), 62 (2010). [N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, N.I. Chkhalo. *Bull. Russ. Academy of Sciences: Physics*, **74** (1), 53 (2010). DOI: 10.3103/S1062873810010144]
- [15] А.А. Ахсахалян, А.Д. Ахсахалян, С.А. Гарахин, Н.Ф. Ерхова, А.С. Кириченко, С.В. Кузин, Н.Н. Салашенко, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало. *ЖТФ*, **89** (11), 1770 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.11.48342.124-19 [A.A. Akhsakhalyan, A.D. Akhsakhalyan, S.A. Garakhin, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, N.I. Chkhalo, N.F. Erkhova, A.S. Kirichenko, S.V. Kuzin. *Tech. Phys.*, **64** (11), 1680 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219110033]
- [16] А.А. Ахсахалян, А.Д. Ахсахалян, Д.Г. Волгунов, М.В. Зорина, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, **7**, 93 (2015). DOI: 10.7868/S0207352815070033
- [17] А.К. Чернышев, И.В. Мальшев, А.Е. Пестов, Н.И. Чхало. *ЖТФ*, **89** (11), 1650 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.11.48323.133-19 [A.K. Chernyshev, I.V. Malyshev, A.E. Pestov, N.I. Chkhalo. *Tech. Phys.*, **64** (11), 1560 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219110069]
- [18] М.В. Зорина, И.М. Неведов, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашенко, С.А. Чуринов, Н.И. Чхало. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, **8**, 9 (2015). DOI: 10.7868/S0207352815080193 [M.V. Zorina, I.M. Nefedov, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, S.A. Churin, N.I. Chkhalo. *J. Surf. Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, **9** (4), 765 (2015). DOI: 10.1134/S1027451015040394]
- [19] С.П. Радзевич. *Формообразование поверхностей деталей (Основы теории)* (Растан, Киев, 2001)
- [20] Ш.Х. Нгуен. *Новая наука: Современное состояние и пути развития*, **12** (4), 99 (2016).
- [21] Б.Б. Пономарев, Ш.Х. Нгуен. *Вестник Иркутского гос. тех. ун-та*, **22** (4), 62 (2018). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-62-72
- [22] X.L. Le, K. Kim, S.H. Choa. *Intern. J. Precision Engineer. Manufactur.*, **23**, 347 (2022). DOI: 10.1007/s12541-021-00602-1
- [23] V.S. Balderrama, J.A. Leon-Gil, D.A. Fernandez-Benavides, J. Ponce-Hernandez, M. Bandala-Sanchez. *IEEE Sensors J.*, **22** (3), 1939 (2022). DOI: 10.1109/JSEN.2021.3135543
- [24] R. Sharma, I. Yadav, A. Meena, M. Kumar, R. Saxena, K.K. Jain. *Phys. Semicond. Dev.*, **215**, 855 (2019).

- [25] C. Pollock, J. Morrison, M. Imboden, T.D.C. Little, D.J. Bishop. *Opt. Express*, **25** (17), 20274 (2017). DOI: 10.1364/OE.25.020274
- [26] A.V. Krysko, J. Awrejcewicz, I.V. Papkova, V.A. Krysko. *Materials*, **13**, 3187 (2020). DOI: 10.3390/ma13143187
- [27] A.A. Dedkova, I.V. Florinsky, N.A. Djuzhev. *Proceed. SPIE — The Intern. Society for Opt. Engineer.*, 12157, 121571K (2022). DOI: 10.1117/12.2623908
- [28] A.A. Дедкова, И.В. Флоринский, Е.Э. Гусев, Н.А. Дюжев, М.Ю. Фомичев, М.Ю. Штерн. *Дефектоскопия*, **11**, 41 (2021). DOI: 10.31857/S0130308221110051 [A.A. Dedkova, I.V. Florinsky, E.E. Gusev, N.A. Dyuzhev, M.Yu. Fomichev, M.Yu. Shtern. *Russ. J. Nondestructive Testing*, **57** (11), 1000 (2021). DOI: 10.1134/S1061830921110073]
- [29] A.A. Дедкова, И.В. Флоринский, Н.А. Дюжев. УФН, принята к публикации (2021). DOI: 10.3367/UFNr.2021.10.039076 [A.A. Dedkova, I.V. Florinsky, N.A. Djuzhev. *Phys. Usp.*, accepted (2021). DOI: 10.3367/UFNe.2021.10.039076]
- [30] P.A. Shary, L.S. Sharaya, A.V. Mitusov. *Geoderma*, **107** (1/2), 1 (2002). DOI: 10.1016/S0016-7061(01)00136-7
- [31] I.V. Florinsky, A.N. Pankratov. *Intern. J. Geograph. Inform. Sci.*, **30** (12), 2506 (2016). DOI: 10.1080/13658816.2016.1188932
- [32] A.A. 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.2021.10.51357.121-21
- [33] Н.А. Дюжев, Е.Э. Гусев, А.А. Дедкова, Д.А. Товарнов, М.А. Махиборода. *ЖТФ*, **90** (11), 1838 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.11.49971.107-20 [N.A. Djuzhev, E.E. Gusev, A.A. Dedkova, D.A. Tovarnov, M.A. Makhiboroda. *Tech. Phys.*, **65** (11), 1755 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220110055]
- [34] A.A. 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. *Russ. J. Nondestructive Testing*, **56** (5), 452 (2020). DOI: 10.1134/S1061830920050046]
- [35] F. Zhao. *Proceedings Modeling, Signal Processing, and Control for Smart Structures*, **6926**, 69260W (2008). DOI: 10.1117/12.775511
- [36] R.H. Plaut. *Acta Mech.*, **202**, 79 (2009). DOI: 10.1007/s00707-008-0037-3
- [37] J. Neggels, J.P.M. Hoenagels, F. Hild, S. Roux, M.G.D. Geers. *Experimental Mechan.*, **54** (5), 717 (2014). DOI: 10.1007/S11340-013-9832-4
- [38] Л.Е. Андреева. *Упругие элементы приборов* (Машгиз, М., 1962)
- [39] С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. *Пластини и оболочки* (Наука, М., 1966)
- [40] G.G. Stoney. *Proceed. Royal Society of London. Series A*, **82** (553), 172 (1909). DOI: 10.1098/RSPA.1909.0021
- [41] Н.В. Филимонова, К.А. Данилова, П.Н. Миронова. *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*, **2** (4–1), 353 (2014). DOI: 10.12737/4778