

ОПЕРАТИВНАЯ НЕРАЗРУШАЮЩАЯ МЕТОДИКА АНАЛИЗА ПРОГИБА МЕМБРАН, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА ПЛАСТИНЕ

© 2020 г. А.А. Дедкова^{1,*}, Н.А. Дюжев¹, Е.Э. Гусев¹, М.Ю. Штерн¹

¹ *Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Россия
124498 Москва, Зеленоград, пл. Шокина, 1
E-mail: *dedkova@ckp-miet.ru*

Поступила в редакцию 08.10.2019; после доработки 19.02.2020
Принята к публикации 13.03.2020

Описана неразрушающая методика автоматического анализа прогиба расположенных на пластине мембранных структур, которые являются ключевым элементом приборов на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС-приборов). Методика включает проведение анализа пластин на оптическом профилометре в специализированном режиме и математическую обработку результатов измерений. Методика позволяет определять величину и знак прогиба мембранных структур для каждой области измерения. Результатом методики является градация величины прогиба и фиксация следующих типов состояния мембранных структур, важных для оценки выхода годных и надежности МЭМС-приборов на их основе: отрыва или разрыва структуры, значительного прогиба структуры, небольшого прогиба структуры, отсутствия прогиба структуры. Все результаты отображаются в формате карты на поверхности пластины с мембранными структурами с возможностью доступа к более подробным данным. Разработанная методика позволяет локализовать области с максимальным, заданным и низким выходом годных кристаллов МЭМС-приборов, а также области с браком по всей поверхности пластины. Использование методики существенно повышает точность и сокращает время измерений для оценки выхода годных мембранных структур, а также дает возможность скорректировать технологический маршрут для увеличения выхода годных кристаллов МЭМС-приборов.

Ключевые слова: неразрушающая методика контроля, оптический профилометр, выход годных кристаллов МЭМС-приборов с мембранными структурами, интерферометрия, технологический маршрут, карта поверхности пластины с различным прогибом мембранных структур, деформация, рельеф, механические напряжения, прочность, мембрана, прогиб.

DOI: 10.31857/S0130308220050073

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в производстве интегральных микросхем и МЭМС-приборов стремятся к максимальной оптимизации процесса проведения измерений по времени и уменьшению степени воздействия на пластины человеческого фактора путем автоматизации процесса [1]. Это может быть реализовано на предприятиях как путем использования возможностей современного контрольного оборудования, так и с помощью разработки новых автоматизированных измерительных методик для старых контрольных систем. Данная работа посвящена реализации второго подхода, а именно разработке оперативной неразрушающей методики контроля выхода годных и уровня брака мембранных структур МЭМС-приборов посредством измерения оптическим профилометром в специализированном режиме прогиба мембран, расположенных на пластине, и математической обработки результатов измерений.

Описанный подход является продолжением разработок авторов в области автоматизации измерений, связанных с созданием и внедрением методик картирования поверхности пластин и определения локальных остаточных механических напряжений в тонких пленках [2, 3].

Цель данной работы — разработка оперативной неразрушающей методики контроля выхода годных и уровня брака мембранных структур кристаллов МЭМС-приборов на поверхности пластин на базе созданного программно-аппаратного комплекса для оперативного измерения прогибов мембран.

АНАЛИЗ МЕМБРАННЫХ СТРУКТУР

Кристаллы с мембранными структурами применяются во многих МЭМС-приборах и производятся на кремниевых пластинах по планарной технологии [4].

Например, в рентгеновских трубках прострельного типа мембранная структура является частью анодного узла [5] и определяет размер фокусного пятна и интенсивность рентгеновского излучения. При этом мембрана должна быть достаточно прочной, поскольку внутри трубки для снижения потерь электронов создается пониженное давление, что приводит к воздействию на мем-

бранный анодный узел перепада давления, который может привести к критической деформации или разрушению мембраны и последующей неработоспособности устройства.

Для определения прочностных характеристик мембран используются методики, основанные на анализе величины их прогиба от значения избыточного давления [6—9]. Прогибом мембраны называют величину перепада высот между максимальной по модулю координатой точки рельефа мембраны и плоскостью поверхности пластины, соответствующей основанию мембраны. Для более точного определения величины прогиба, вызванного приложенным давлением, необходимо первоначально определить величину исходного прогиба (вызванного остаточными напряжениями, возникшими в результате проведенных технологических операций изготовления мембраны). Важно отметить, что при анализе изменения прогиба от приложенного давления исследователи часто пренебрегают наличием исходного прогиба, а также в подавляющем большинстве случаев не учитывают особенности исходной формы мембраны, что необходимо для проведения точного расчета.

Другим примером можно назвать тепловые датчики для измерения скорости потока газовой или воздушной среды, основанные на эффекте изменения электрического сопротивления резисторов от температуры, в которых на мембранах расположены нагревательный и измерительные резисторы [10]. При этом поверхность мембраны должна быть достаточно ровной (обладать небольшим прогибом) для повышения чувствительности тепловых датчиков.

Таким образом, в процессе отработки технологии изготовления МЭМС-приборов с мембранными элементами [11] основное внимание уделяется отработке изготовления мембранных структур, поскольку их параметры определяют характеристики конечного устройства.

Одной из ключевых операций создания мембранных структур является сквозное травление кремниевых пластин с обратной стороны через маску до диэлектрических слоев, сформированных на лицевой стороне пластин. В процессе такого глубокого травления часто наблюдается недостаточная селективность фоторезистивной или алюминиевой маски к монокристаллическому кремнию. Также нельзя не отметить сложность контроля момента окончания процесса травления толстого (сотни микрометров) кремния при сохранении тонкого (сотни нанометров) материала мембраны.

В связи с этим перед разработчиками МЭМС-приборов на базе мембранных структур стоит задача выбора оптимальных параметров технологических процессов на основе тестирования характеристик мембранных структур. В настоящее время подобные методики активно разрабатываются [12—23].

Применение бесконтактных методик контроля мембранных структур на поверхности кремниевых пластин приводит к оптимизации технологического маршрута и повышению выхода годных изделий [2]. Стандартной неразрушающей методикой анализа мембранных структур на пластине является анализ рельефа поверхности пластины в областях их расположения, который определяется посредством оптического профилометра в режиме вертикальной сканирующей интерферометрии [24, 25]. При этом проводится построение карты рельефа поверхности и определение прогиба мембраны. Данный исходный прогиб связан с наличием остаточных напряжений, возникших в результате технологических операций изготовления мембраны, и влияет на эксплуатационные характеристики конечных изделий.

При оценке результатов проведения технологических операций обычно делается выборка из нескольких кристаллов. Отбор кристаллов для измерений может быть проведен как после операции разделения пластины на кристаллы ведущим партию технологом, так и на целой пластине оператором измерительной установки. Однако для полноценного анализа необходимо проверить все мембранные структуры на пластине. Это позволит построить карту пластины и оценить распределение годных кристаллов. Локализация областей с удовлетворительными и неудовлетворительными характеристиками мембран позволит провести соответствие между особенностями технологического маршрута (неравномерностью по площади пластин процессов формирования и травления пленок) и выходным распределением параметров структур по пластине. Также в случае большого процента брака можно ввести в состав мембран дополнительный слой с растягивающими или сжимающими напряжениями.

Использование стандартной поштучной методики анализа кристаллов с мембранными структурами приводит к значительному увеличению времени проведения измерений. Стоит отметить, что с учетом тенденции к увеличению количества кристаллов на пластине (за счет снижения размера элементов одновременно с увеличением диаметра пластин [26—35]), будут требоваться существенные временные затраты оператора и измерительного оборудования.

Отдельно следует отметить, что при использовании стандартной методики определения величины прогиба мембраны результат анализа будет отличаться в зависимости от выбора линии профиля и положения курсора, которые определяются вручную оператором. Это приводит к снижению точности и сопоставимости результатов измерений при анализе всей пластины.

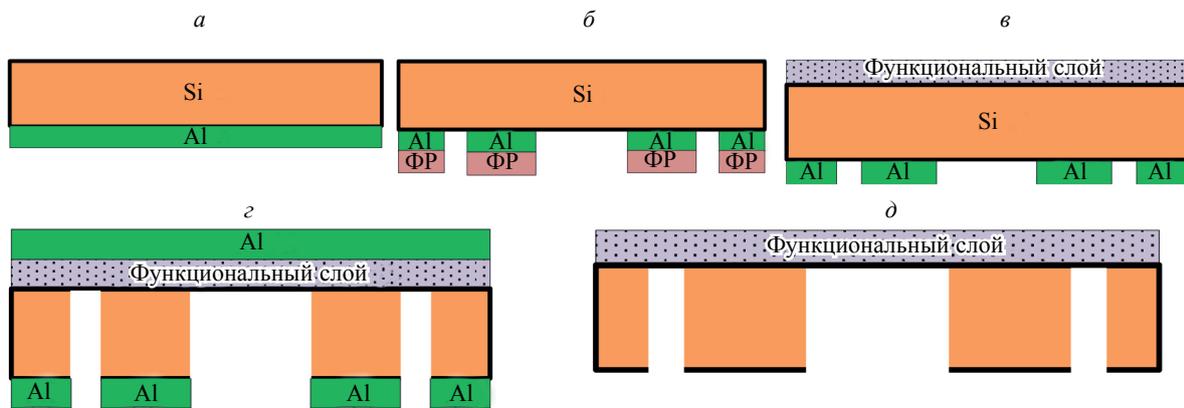


Рис. 1. Технологический маршрут изготовления мембранных структур на кремниевых пластинах:

a — после осаждения слоя алюминия на обратную сторону пластины; *б* — после формирования фоторезистивной маски и травления через нее слоя алюминия; *в* — после удаления фоторезистивной маски и осаждения функционального слоя, формирующего мембрану на лицевой стороне пластины; *г* — после сквозного травления кремниевой подложки через алюминиевую маску; *д* — финальная мембранная структура после удаления алюминиевой маски.

Таким образом, актуальной задачей является разработка и апробация методики анализа мембранных структур интегрально на всех кристаллах МЭМС-приборов, сформированных на пластине. Данный подход позволяет локализовать области с максимальными значениями выхода годных кристаллов и области брака по всей поверхности пластины, значительно сократить время измерения всех кристаллов и уменьшить влияние человеческого фактора.

Апробация разработанной авторами методики проведена на пластине диаметром 150 мм, на которой располагались 288 кристаллов квадратной формы со стороной 6 мм с мембранными структурами различного диаметра. Данные структуры изготавливались по технологическому маршруту, представленному на рис. 1.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Для достижения поставленной цели была разработана методика с использованием оптического профилометра Veeco Wyko NT 9300. Это оборудование позволяет строить и анализировать трехмерную карту поверхности пластины в областях расположения мембранных структур (рис. 2), определять величину их прогиба (рис. 3). Методика включает регистрацию профиля поверхности в специализированном режиме и анализ прогиба мембраны с использованием разработанной программы [36].

Разработан алгоритм анализа отдельной мембраны, который вошел как составная часть в алгоритм анализа мембран по всей площади пластины. Для автоматизации процесса измерений на базе программного обеспечения Veeco Wyko NT 9300 построена специальная сетка, размеры ячеек которой соответствуют областям расположения мембран, а полные размеры сетки соответствуют анализируемой рабочей площади пластины. Режимы измерения устанавливаются так же, как и в стандартном случае. После запуска процесса измерения определяются экспериментальные данные, соответствующие координатам точек на поверхности анализируемой области. Указанные данные записываются в виде отдельных файлов для дальнейшей обработки. Количество отдельных файлов соответствует количеству кристаллов. Эти файлы впоследствии используются для расчета величины и знака прогиба мембран с помощью разработанной программы.

Для каждой из анализируемых областей поверхности пластины с мембранами в первую очередь необходимо определить тип состояния мембран. В разработанной методике выделено 4 типа состояния мембран. Первый тип состояния: в анализируемой области отсутствуют признаки рельефа, соответствующие наличию мембраны с прогибом, то есть область анализа представлена гладкой поверхностью (значение прогиба менее 1 микрона). Второй тип состояния: анализируемый участок характеризуется наличием отверстия, то есть мембрана разрушена (брак). Мембрана с прогибом от 1 до 10 мкм соответствует третьему типу состояния, мембрана с прогибом более 10 мкм — четвертому типу состояния.

Далее описаны ключевые операции алгоритма анализа мембраны.

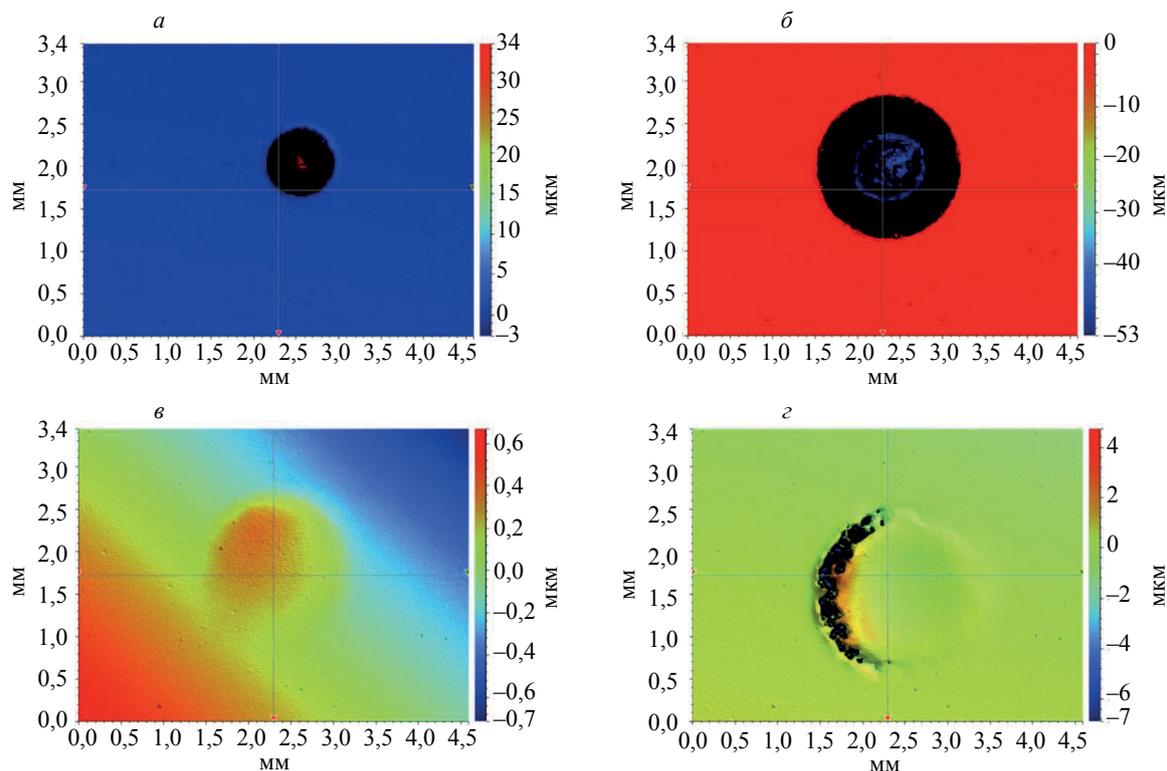


Рис. 2. Изображения различных мембран, полученных с использованием оптического профилометра Veeco Wyko NT 9300 (показаны содержащие мембрану области поверхности размером порядка $3,4 \times 4,5$ мм², цветовая шкала соответствует уровню поверхности в мкм).

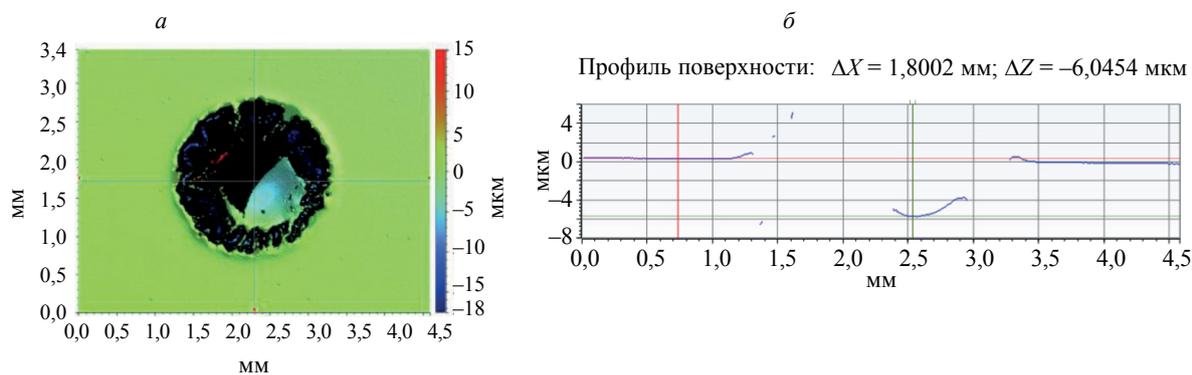


Рис. 3. Изображение мембраны (а) и профиль поверхности (б), полученные с помощью оптического профилометра Veeco Wyko NT 9300.

Сначала выполняется операция выравнивания, которая заключается в удалении наклона поверхности (рис. 4 а, б).

Поскольку экспериментальные данные могут содержать точечные дефекты или загрязняющие частицы, присутствует алгоритм для удаления таких пиковых выбросов.

Для определения параметров мембранных структур первоначально необходимо определить зону, в которой расположена мембрана. Поскольку образец невозможно расположить идеально ровно для проведения измерений, мембрана смещена относительно центра поля зрения (см. рис. 2). При исследованиях могут присутствовать мембраны различного диаметра (см. рис. 2), что зависит от используемого литографического рисунка. Определение области расположения мембраны с различным типом состояния осуществляется путем сравнения данных со средним уровнем поверхности, полученным на предыдущем этапе при выравнивании поверхности, что позволяет определить граничные области расположения мембранной структуры.

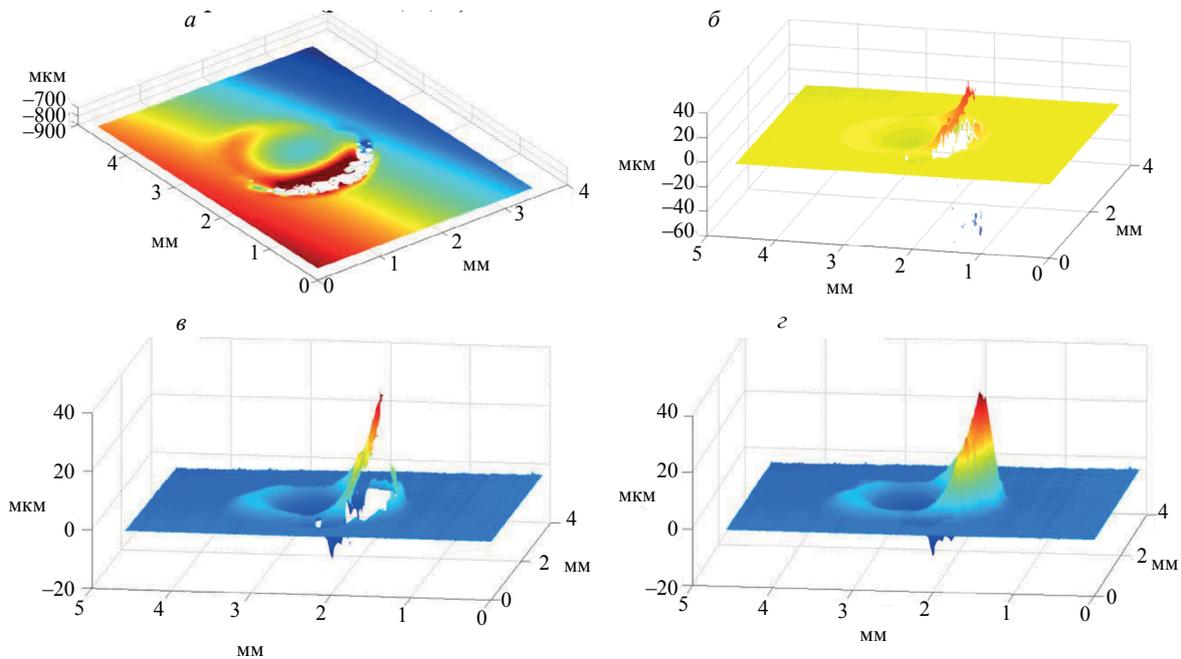


Рис. 4. Вид области с мембраной: *а* — исходные экспериментальные данные, *б* — после удаления линейного наклона, *в* — после усреднения, *з* — после восстановления промежуточных данных.

В случае отсутствия значимых данных, отличающихся от среднего уровня поверхности, делается вывод, что область анализа представлена гладкой поверхностью, то есть выделяется тип состояния мембраны «1». Тип состояния мембраны «2» отличается отсутствием информативных данных в предполагаемой области присутствия мембраны, то есть преобладают неопределенные значения (Not a Number — NaN). Если не зафиксированы типы состояний «1» и «2», то делается вывод, что в данной области присутствует мембранная структура с ненулевым прогибом, то есть возможны типы состояний мембран «3» и «4».

Важной особенностью работы с экспериментальными данными является частичное отсутствие результатов измерения (черные области на рис. 2 и 3а, пустые области на рис. 3б, соответствующие NaN), которое учитывалось при обработке результатов. Это приводит к необходимости проводить не только процедуры усреднения и сглаживания данных (рис. 4в), но и процедуры восстановления данных (рис. 4з).

Затем в предполагаемой зоне присутствия мембраны рассчитывается прогиб. Численная величина прогиба вычисляется исходя из максимального перепада по вертикальной оси между измеренными данными и средним уровнем поверхности. При этом учитывается, что максимальный прогиб должен быть ближе к центру мембраны. Для этого анализ областей ближе к краю мембраны не проводится, что позволяет отсеять ряд неинформативных особенностей экспериментальных данных. Также определяется преимущественная тенденция выпуклости или вогнутости рельефа мембранной структуры (см. рис. 3).

При разработке программы для анализа прогиба мембран на пластине учитывалось, что оператору важно иметь возможность получения полной краткой информации о всех мембранных структурах на пластине: о типе состояния мембраны (одном из 4 типов состояния), о величине прогиба и его знаке (выпуклость или вогнутость). Вышеуказанная информация выводится на экран для всех мембран на пластине в кратком и удобном для восприятия виде. Пример результата расчета величины прогиба по карте поверхности пластины с мембранными структурами приведен на рис. 5.

Для реализации вышеуказанной задачи и составления удобного интерфейса пользователя использовалась среда визуального программирования. Расположение кристаллов с мембранами на пластине отображается с помощью сетки. Различные цвета ячеек сетки и текста позволяют оператору быстро проанализировать характеристики мембран. Представление данных наглядно показывает расположение областей, в которых мембрана критически деформирована.

После анализа карты поверхности в целом, оператор может получить доступ к более подробной информации, нажав на соответствующую ячейку сетки. При этом он получает информацию

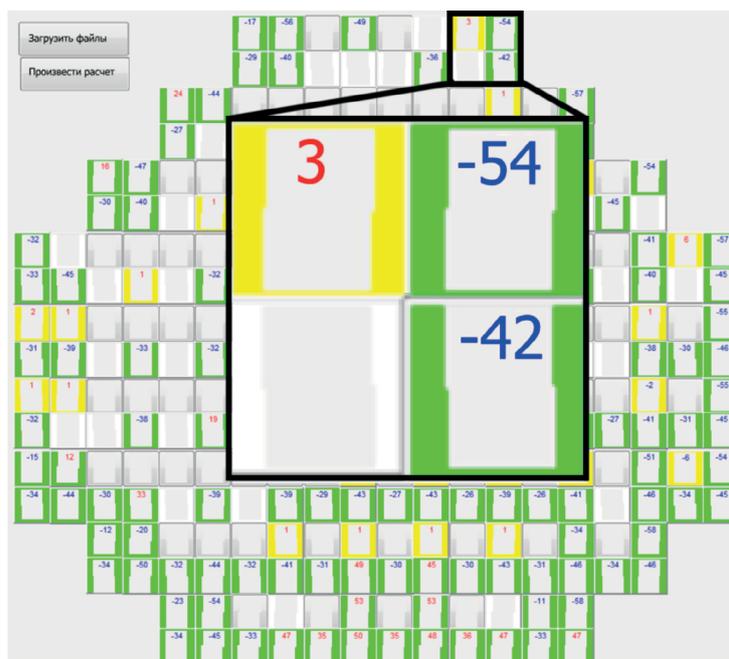


Рис. 5. Вид окна программы с рассчитанными значениями прогиба в мкм для всех мембран, расположенных в ячейках сетки: серая ячейка — мембрана без прогиба (тип состояния «1»); белая ячейка — мембрана критически деформирована (тип состояния «2»); желтая ячейка — мембрана с небольшим прогибом (тип состояния «3»); зеленая ячейка — мембрана с существенным прогибом (тип состояния «4»).

о сложной форме поверхности мембраны, которую стоит использовать впоследствии для анализа при расчете прочностных характеристик мембраны.

Проведен анализ необходимого времени для выполнения исследований с использованием стандартной методики и вышеописанной методики. Процесс выбора области измерения занимает $10 \cdot N$ с для стандартной методики и 10 с для разработанной методики (выбор первой области измерения), где N — количество кристаллов на пластине. При этом продолжительность процесса непосредственного измерения зависит от величины перепада высот и в среднем занимает около $20 \cdot N$ с для обоих случаев. Первичный анализ данных занимает около $20 \cdot N$ с для стандартной методики и менее 1 с для разработанной методики. Сохранение данных занимает около $10 \cdot N$ с для стандартной методики и менее 1 с для разработанной методики. Итого $(10 + 20 + 20 + 10) \cdot N$ с, то есть $60 \cdot N$ с — время, затраченное на измерение N мембранных структур с использованием стандартной методики, $(10 + 20 \cdot N + 1 + 1)$ с — время для измерения N мембранных структур по разработанной методике. Из этого следует, что время измерения сокращается в 2-3 раза. При этом длительность присутствия оператора непосредственно в процессе измерений на оптическом профилометре сокращается со всего процесса измерения $60 \cdot N$ с до операции выбора области измерения в 10 с. Время, необходимое для запуска оборудования и установки образца, в обоих случаях одинаково и при анализе не учитывалось.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана неразрушающая методика автоматического анализа прогиба мембран, расположенных на пластине. Методика включает измерение мембранных структур на всей площади пластины и автоматическое определение прогиба по всем мембранам на пластине, оптимизирует последующий анализ. Применение подобных методик оптимально в случае необходимости анализа мембранных структур на всей площади пластины. Данный подход позволяет локализовать области с максимальным выходом требуемых кристаллов МЭМС-приборов и области брака по всей поверхности пластины, значительно сократить время измерения всех кристаллов на пластине. Использование данной методики позволяет повысить точность оценки выхода годных мембранных структур, а также скорректировать их технологические маршруты для увеличения выхода годных кристаллов.

Авторы выражают благодарность ведущему инженеру ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база» НИУ МИЭТ Кирееву В.Ю. за обсуждения материалов статьи и сделанные полезные замечания.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база» МИЭТ при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2019-1650, уникальный идентификатор проекта RFMEFI59419X0018).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Банников Е.В. Использование ППК в промышленности // International Scientific Review of the Problems and Prospects of Modern Science and Education. 2019. С. 25—28.
2. Djuzhev N.A., Gusev E.E., Dedkova A.A., Makhboroda M.A. Non-destructive method of surface mapping to improve accuracy of mechanical stresses measurements // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. V. 289(1). P. 012007. DOI: 10.1088/1757-899X/289/1/012007
3. Djuzhev N.A., Dedkova A.A., Gusev E.E., Makhboroda M.A., Glagolev P.Y. Non-Contact Technique for Determining the Mechanical Stress in thin Films on Wafers by Profiler // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. V. 189(1). P. 012019. DOI: 10.1088/1757-899X/189/1/012019
4. Киреев В.Ю. Введение в технологии микроэлектроники и нанотехнологии. М.: ФГУП «ЦНИИХМ», 2008. 432 с.
5. Djuzhev N.A., Makhboroda M.A., Preobrazhensky R.Y., Demin G.D., Gusev E.E., Dedkova A.A. Development and study of a conceptual model of an X-ray source with a field emission cathode // Journal of Surface Investigation. 2017. V. 11(2). P. 443—448. DOI: 10.1134/S1027451017020239
6. Gusev E.E., Borisova A.V., Dedkova A.A., Salnikov A.A., Kireev V.Yu. The effect of ion beam etching on mechanical strength multilayer aluminum membranes // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus. 2019. V. 8657243. P. 1990—1994. DOI: 10.1109/ElConRus.2019.8657243.
7. Zhao F. Nonlinear solutions for circular membranes and thin plates // Proceedings Modeling, Signal Processing, and Control for Smart Structures. 2008. V. 6926. P. 69260W. DOI: 10.1117/12.775511
8. Plaut R.H. Linearly elastic annular and circular membranes under radial, transverse, and torsional loading. Part I: large unwrinkled axisymmetric deformations // Acta Mech. 2009. V. 202. P. 79—99. DOI: 10.1007/s00707-008-0037-3.
9. Neggiers J., Hoenagels J.P.M., Hild F., Roux S., Geers M.G.D. Direct Stress-Strain Measurements from Bulged Membranes Using Topography Image Correlation // Experimental Mechanics. 2014. V. 54. Is.5. P. 717—727. DOI: 10.1007/s11340-013-9832-4
10. Беспалов В.А., Васильев И.А., Дюжев Н.А., Мазуркин Н.С., Новиков Д.В., Попков А.Ф. Моделирование первичного преобразователя скорости потока газа мембранного типа // Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА. 2014. № 3(107). С. 50—56.
11. Dyuzhev N.A., Gusev E.E., Gryazneva T.A., Dedkova A.A., Dronova D.A., Kireev V.Y., Kirilenko E.P., Migunov D.M., Novikov D.V., Patyukov N.N., Presnukhina A.A., Bakun A.D., Ermakov D.S. Fabrication and Study of Parameters and Properties of Nanostructured Membranes for MEMS Devices // Nanotechnologies in Russia. 2017. V. 12(7-8). P. 426—437. DOI: 10.1134/S1995078017040073
12. Djuzhev N.A., Gusev E.E., Dedkova A.A., Patiukov N.N. Determination of mechanical stress in the silicon nitride films with a scanning electron microscope // Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering. 2016. P. 1022428. DOI: 10.1117/12.2250118
13. Muruganandam D. Influence of Post Weld Heat Treatment in Friction Stir Welding of AA6061 and AZ61 Alloy // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54(4). P. 294—301. DOI: 10.1134/s1061830918040095
14. Volchkov S.O., Dukhan A.E., Dukhan E.I., Kurljanskaya G.V. Computer-aided inspection center for magnetoimpedance spectroscopy // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2016. V. 52(11). P. 647—652. DOI: 10.1134/s1061830916110097
15. Rudnitsky V.A., Kren A.P., Lantsman G.A. Determining Yield Strength of Metals by Microindentation with a Spherical Tip // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55(2). P. 162—168. DOI: 10.1134/S1061830919020098
16. Donati S., Martini G. 3D Profilometry with a Self-Mixing Interferometer: Analysis of the Speckle Error // IEEE Photonics Technology Letters. 2019. V. 31(7). P. 545—548. DOI: 10.1109/LPT.2019.2901274
17. Vairavan R., Ong N.R., Sauli Z., Kirtsaeng S., Sakuntasathien S., Shahimin M.M., Alcain J.B., Lai S.L., Paitong P. and Retnasamy V. 3D silicon breast surface mapping via structured light profilometry // AIP Conference Proceedings. 2017. V. 1885. Is.1. P.020252. DOI: 10.1063/1.5002446
18. Bazulin A.E., Bazulin E.G. Application of antenna arrays and organosilicon polymers as an immersion medium for ultrasonic testing of objects with rough surfaces // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. V. 50(7). P. 377—384. DOI: 10.1134/s106183091407002x

19. Panjan P., Cekada M., Panjan M., Curkovic L., Paskvale S. Surface density of growth defects in different PVD hard coatings prepared by sputtering // *Vacuum*. 2012. V. 86(6). P. 794—798. DOI: 10.1016/j.vacuum.2011.07.013
20. Kovalevskaya Z.G., Uvarkin P.V., Tolmachev A.I. Some features of the formation of the surface microrelief of steel under ultrasonic finishing treatment // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2012. V. 48(3). P. 153—158. DOI:10.1134/s1061830912030047
21. Osipov S.P., Usachev E.Y., Chakhlov S.V., Shchetinkin S.A., Osipov O.S. Specific Features of Material Recognition by the Multi-Energy X-Ray Method // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019. V. 55(4). P. 308—321. DOI: 10.1134/s1061830919040119
22. Ивина Н.Ф., Балабаев С.М., Тагильцев А.А. Анализ собственных колебаний круглых изгибных пьезопреобразователей мембранного типа с произвольным соотношением размеров // *Дефектоскопия*. 2003. № 8. С. 24—31.
23. Владимиров А.П., Капустин Д.С. Сравнительный анализ методов динамической и голографической интерферометрии на примере деформаций мембраны // *Дефектокопия*. 2004. № 1. С. 76—81.
24. Jiang C., Kilcullen P., Liu X., Ozaki T., Liang J. Three-dimensional structured light profilometry using a bandwidth-limited projector // *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*. 2019. V. 109320. P. 109320K. DOI: 10.1117/12.2510145
25. Mao C-L., Lu R-S., Dong J-T., Zhang Y-Z. Overview of the 3D Profilometry of Phase Shifting Fringe Projection // *Jiliang Xuebao/Acta Metrologica Sinica*. 2018. V. 39(5). P. 628—640. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1158.2018.05.07
26. Rhee H.S., Kim I.R., Jeong J.H., Son N.K., Hong H.B., Cho S.I., Park Y.M., Kim D.W., Choi Y.K., Ahn J.H., Kang S.G., Yeo K.H., Kim J.T., Lee E.C., Youn J.M., Yoon J.S. 8LPP Logic Platform Technology for Cost-Effective High Volume Manufacturing // *Symposium on VLSI Technology*. 2018. P. 217—218. DOI: 10.1109/VLSIT.2018.8510673
27. Lanzillo N.A., Motoyama K., Hook T., Clevenger L. Impact of Line and Via Resistance on Device Performance at the 5nm Gate All Around Node and beyond // *IEEE International Interconnect Technology Conference*. 2018. V. 8430294. P. 70—72. DOI: 10.1109/IITC.2018.8430294
28. Bae G., Bhuwarka K.K., Lee S-H., Song M.-G., Jeon T-S., Kim C., Kim W., Park J., Kim S., Kwon U., Jeon J., Nam K-J., Lee S., Lian S., Seo K-I., Lee S-G., Park J.H., Heo Y-C., Rodder M.S., Kittl J.A., Kim Y., Hwang K., Kim D-W., Liang M-S., Jung E.S. A novel tensile Si (n) and compressive SiGe (p) dual-channel CMOS FinFET co-integration scheme for 5nm logic applications and beyond // *Technical Digest—International Electron Devices Meeting*. 2017. V. 7838496. P. 28.1.1—28.1.4. DOI: 10.1109/IEDM.2016.7838496
29. Ming L., Kyoung H.Y., Sung D.S., Yun Y.Y., Kim D-W., Tae Y.C., Kyung S.O., Lee W-S. Sub-10 nm gate-all-around CMOS nanowire transistors on bulk Si substrate // *Digest of Technical Papers—Symposium on VLSI Technology*. 2009. V. 5200646. P. 94—95.
30. Braun T., Becker K.-F., Voges S., Bauer J., Kahle R., Bader V., Thomas T., Aschenbrenner R., Lang K.-D. 24”×18” Fan-out panel level packing // *Proceedings—Electronic Components and Technology Conference*. 2014. V. 6897401. P. 940—946. DOI:10.1109/ECTC.2014.6897401
31. Koitzsch M., Lewke D., Schellenberger M., Pfitzner L., Ryssel H., Zühlke H-U. Enhancements in resizing single crystalline silicon wafers up to 450 mm by using thermal laser separation // *ASMC (Advanced Semiconductor Manufacturing Conference) Proceedings*. 2012. V. 6212923. P. 336—341. DOI: 10.1109/ASMC.2012.6212923
32. Yang Y., Kushner M.J. 450 mm dual frequency capacitively coupled plasma sources: Conventional, graded, and segmented electrodes // *Journal of Applied Physics*. 2010. V. 108(11). P. 113306. DOI: 10.1063/1.3517104
33. Fischer A., Kissinger G. Load induced stresses and plastic deformation in 450 mm silicon wafers // *Applied Physics Letters*. 2007. V. 91(11). P. 111911. DOI: 10.1063/1.2784964
34. Pettinato J.S., Pillai D. Technology decisions to minimize 450-mm wafer size transition risk // *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*. 2005. V. 18(4). P. 501—509. DOI: 10.1109/TSM.2005.858471
35. Ge M., Zhu H., Huang C., Liu A., Bi W. Investigation on critical crack-free cutting depth for single crystal silicon slicing with fixed abrasive wire saw based on the scratching machining experiments // *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2018. V. 74. P. 261—266. DOI: 10.1016/j.mssp.2017.10.027
36. Дедкова А.А., Дюжев Н.А. Программа обработки данных серии измерений мембранных структур для определения их прогиба и качественных особенностей. Свидетельство на программу для ЭВМ № 2019663188.