

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 681.586.62+536.516.2+629.5.052.5+629.3.052.5+681.586.36+531.728+303.722.8

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ВЫХОДНОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ МАТРИЦЫ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ БИМАТЕРИАЛЬНЫХ ПРИЕМНИКОВ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА МЕТОДОМ ОСОБЕННОСТЬ-ОРИЕНТИРОВАННОГО СКАНИРОВАНИЯ

© 2015 г. Р. В. Лапшин*, **, Р. З. Хафизов*, Е. А. Фетисов*

*Московский институт электронной техники
Россия, 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, 1

**НИИ физических проблем им. Ф.В. Лукина
Россия, 124460, Москва, Зеленоград, Георгиевский просп., 5

E-mail: fetisov@dsd.miee.ru

Поступила в редакцию 15.09.2014 г.

Описано применение метода особенность-ориентированного сканирования (о.о.с.) для математической обработки выходного оптического изображения неохлаждаемой инфракрасной (и.к.) матрицы 32×32 элемента. Чувствительные элементы и.к.-матрицы представляют собой микромеханические биматериальные и.к.-приемники. Рассматриваемая и.к.-матрица является микрооптомеханической системой (м.о.м.с.). Считывание оптического изображения матрицы в видимой области спектра осуществляется посредством оптического профилометра (интерференционного микроскопа). Предлагаемый метод позволяет исключить из выходного оптического изображения точки, не несущие полезной информации об изображаемом и.к.-объекте, а также учесть артефакты, вносимые считывающим профилометром. Метод пригоден для определения массива корректирующих коэффициентов, устраняющих неодинаковую реакцию биматериальных приемников матрицы на входное и.к.-излучение. Метод также можно использовать для автоматической характеристики экспериментальных м.о.м.с. и выборочного выходного контроля серийных м.о.м.с.

DOI: 10.7868/S0032816215050110

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно развивается направление неохлаждаемых микромеханических биматериальных инфракрасных (и.к.) приемников [1, 2]. В Московском институте электронной техники разработана и изготовлена матрица МЗ-50, состоящая из 32×32 таких и.к.-приемников [3]. Матрица представляет собой микрооптомеханическую систему (м.о.м.с.), в которой считывание и.к.-изображения осуществляется оптическим способом. Матрица предназначена для получения тепловых изображений в диапазоне 8–14 мкм.

Принцип работы чувствительного элемента матрицы (рис. 1а) основан на термомеханическом эффекте, в соответствии с которым при изменении температуры приемной площадки происходит изгиб биматериальной микроконсоли. Изгиб возникает из-за разности коэффициентов теплового расширения пары материалов, из которых изготовлена биматериальная микроконсоль (в матрице МЗ-50 такими материалами являются нестехиометрический нитрид кремния и алюминий).

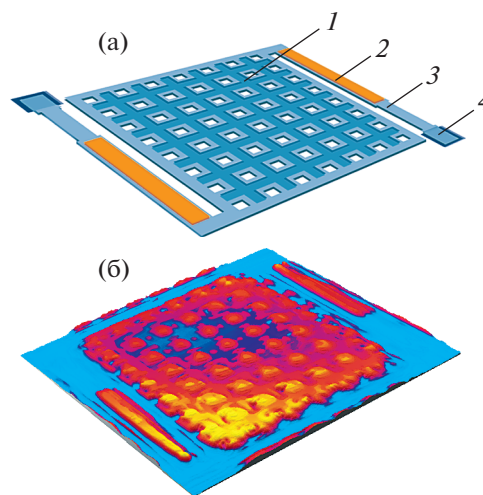


Рис. 1. Неохлаждаемый биматериальный чувствительный элемент и.к.-матрицы МЗ-50 размером 50×50 мкм: а — конструкция чувствительного элемента (1 — приемная мембрана-зеркало, 2 — биматериальный участок микроконсоли, 3 — термоизоляционный участок микроконсоли, 4 — место крепления микроконсоли к подложке (якорь)); б — изображение чувствительного элемента, полученное на оптическом профилометре Wyko NT9300 (увеличение $101\times$, режим вертикальной сканирующей интерферометрии высокого разрешения, сшивка).

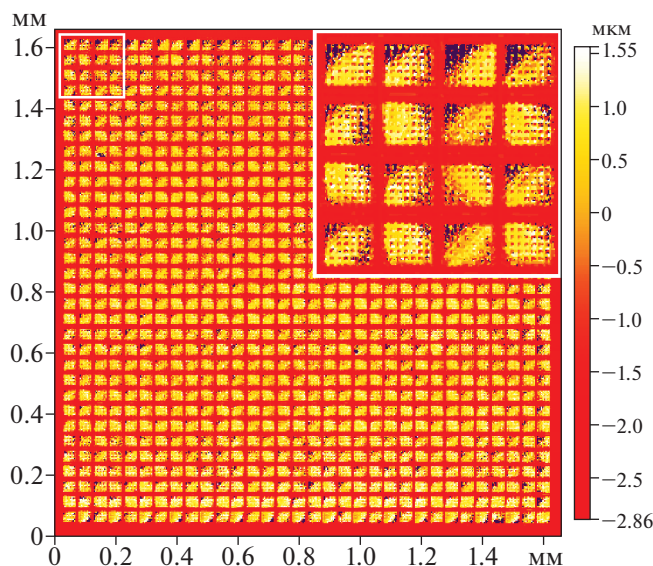


Рис. 2. Оптическое изображение 1738×1717 точек матрицы МЗ-50, состоящей из 32×32 неохлаждаемых биматериальных и.к.-приемников. Изображение получено на оптическом профилометре (увеличение $10.2\times$, режим вертикальной сканирующей интерферометрии высокого разрешения, сшивка). Места, где профилометр из-за сильного наклона краев мембран не смог осуществить считывание, показаны условно черным цветом. Измерения выполнены в вакууме 10^{-3} Торр при температуре модели а.ч.т. 50°C .

В качестве приемной площадки выступает микроминиатюрная мембрана субмикронной толщины из нитрида кремния, покрытая тонкой нихромовой пленкой. Эта же площадка служит зеркалом при считывании матрицы в видимом диапазоне спектра. Изменение температуры источника и.к.-излучения на 1 К вызывает в таких и.к.-приемниках отклонение мембраны на несколько сотен нанометров [1–4], что может быть вполне надежно зафиксировано современными измерительными средствами.

На рис. 1б приведено изображение одиночного биматериального чувствительного элемента и.к.-матрицы, полученное на оптическом профилометре (интерференционном микроскопе белого света) Wyko NT9300 (Bruker, Германия) при большом увеличении [5, 6]. На рисунке хорошо видна мембрана повышенной жесткости, которая висит над подложкой на микроконсолях. Расстояние между мембраной и подложкой составляет ~ 0.5 мкм. Сквозные отверстия в мембране служат на этапе изготовления матрицы для улучшения доступа травителя к жертвенному слою из SiO_2 . На микроконсолях четко видны хорошо отражающие свет биматериальные участки с алюминиевым покрытием.

На рис. 2 показано созданное матрицей выходное оптическое изображение, зарегистриро-

ванное (считанное) с помощью оптического профилометра. Измерения выполнены в вакууме 10^{-3} Торр. Засветка матрицы осуществлялась от модели абсолютно черного тела (а.ч.т.) М316 (Mikron, США), температура модели а.ч.т. составляла 50°C .

Используемый профилометр обеспечивает бесконтактный способ измерения топографии поверхности с перепадами высоты до 10 мм. Предельное вертикальное разрешение профилометра составляет 0.1 нм, латеральное — 0.6 мкм. В зависимости от задаваемого увеличения поля зрения прибора лежат в диапазоне от $4.6 \times 3.5 \text{ мм}^2$ до $30 \times 30 \text{ мкм}^2$. Увеличение меняется ступенчато от $1.4\times$ до $230\times$ при помощи наборов сменных интерференционных объективов и сменных окуляров. При использовании вакуумной камеры максимальное увеличение ограничено $20\times$.

Измерения оптических откликов от биматериальных и.к.-приемников м.о.м.с. выполнялись в режиме вертикальной сканирующей интерферометрии или в режиме вертикальной сканирующей интерферометрии высокого разрешения [5, 7]. Последний режим сочетает в себе субнанометровое вертикальное разрешение и большой вертикальный диапазон измерения высоты рельефа (десятки микрон). Картина, представленная на рис. 2, является реакцией матрицы на равномерную засветку от излучающей площадки модели а.ч.т. Проецирование излучающей площадки модели а.ч.т. на и.к.-матрицу выполнено с помощью германиевого объектива Макро-70.

Испытания и.к.-матрицы в вакуумной камере растрового электронного микроскопа (р.э.м.) JSM-6490LV (Jeol, Япония), в процессе которых осуществлялся ее контактный нагрев/охлаждение через подложку на термостойке МКЗ (Deben, Великобритания), показали, что чувствительность рабочих биматериальных и.к.-детекторов соответствует известной из литературы чувствительности аналогичных детекторов (десятки–сотни нанометров на кельвин) [1, 2]. Выявленная на р.э.м. причина отказа некоторой части и.к.-детекторов заключалась в неполном удалении жертвенного слоя из SiO_2 .

2. ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Поскольку площадь, занятая чувствительными элементами, непосредственно формирующими изображение, составляет примерно 70% от общей площади матрицы, то получаемое оптическое изображение содержит значительное количество точек, которые не несут никакой полезной информации об изображаемом и.к.-объекте (см. рис. 1 и 2). К таким точкам относятся промежутки между и.к.-приемниками и области, занимаемые элементами подвески мембран (участки термоизоляции

микроконсолей, места крепления микроконсолей к подложке). Таким образом, перед выдачей оператору окончательной картинки оцифрованное оптическое изображение матрицы должно быть подвергнуто математической обработке, в ходе которой из изображения следует удалить всю информацию, не относящуюся к наблюдаемой и.к.-сцене.

Поскольку изображение поверхности каждой мембраны, даже при невысоком латеральном увеличении профилометра, состоит из многих точек (от сотен до нескольких тысяч), то это множество точек следует представить на выходном изображении одной единственной точкой. Таким образом, на выходе программы математической обработки должно быть получено изображение с размерностью исходной матрицы, т.е. 32×32 точки, в котором яркость каждой точки есть среднее значение яркостей точек, принадлежащих соответствующей мембране.

Следует отметить, что применяемый для измерений оптический профилометр не может построить изображение поверхности, сильно наклоненной к горизонтальной плоскости, так как свет после отражения от наклонных участков не попадает обратно в объектив профилометра [6, 7]. В зависимости от увеличения объектива предельный угол наклона поверхности составляет от 2° (объектив Майкельсона $2.5\times$) до 35° (объектив Миро $100\times$). Поскольку мембраны-зеркала изготовленной матрицы не являются идеально плоскими и часто имеют из-за остаточных внутренних напряжений загнутые края, то точки, соответствующие таким краям, профилометром не изображаются. На выходном изображении эти точки условно показаны черным цветом (см. вставку на рис. 2) и при определении средней яркости по поверхности мембраны-зеркала их не следует принимать в расчет.

Анализ сформулированных выше особенностей задачи показывает, что для эффективной математической обработки полученного изображения следует использовать методы распознавания. Для построения адекватного алгоритма распознавания было решено вначале провести математическую обработку изображения с помощью уже существующей программы, а затем, основываясь на полученном опыте, сформулировать требования к алгоритму и написать собственную программу распознавания, которую впоследствии можно будет встроить в серийный прибор.

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

В качестве программы распознавания использовалась программа особенность-ориентированного сканирования (о.о.с.) [8, 9], разработанная в НИИ физических проблем им. Ф.В. Лукина. Ос-

новным назначением программы о.о.с. является управление сканирующим зондовым микроскопом (с.з.м.) и проведение особо точных измерений топографии и свойств поверхности в наноскопическом масштабе. В настоящее время программа о.о.с. внедрена в Лаборатории твердотельной нанотехнологии указанного института и управляет серийным прибором Solver™ P4 (НТ-МДТ, Россия).

Помимо реального сканирования программа о.о.с. способна выполнять виртуальное сканирование. В этом режиме на вход программы подается изображение рельефа поверхности (реальное или синтезированное), которое программа “сканирует” и распознает, моделируя работу зондового микроскопа. В нашем случае на вход программы о.о.с. подавалось полученное на профилометре оптическое изображение, представленное на рис. 2. В таком изображении в качестве особенностей поверхности выступают отдельные и.к.-приемники (мембраны-зеркала) распознаваемой матрицы, которые используются программой о.о.с. как опорные точки.

Программа о.о.с. была немного адаптирована под рассматриваемую задачу. В частности, в связи с получаемым в режиме сшивки большим числом точек в оптическом изображении мембраны рабочие размерности сегментов и апертур были увеличены (сегмент — это небольшой квадратный скан, включающий в себя только одну особенность поверхности; апертура — квадратный скан, включающий несколько соседних особенностей [8, 9]). Размерность апертур составила $\geq 64 \times 64$ точки. Размерности, используемые в с.з.м., обычно меньше, особенно при работе на пределе разрешения микроскопа. Также было увеличено предельное число седловых точек, анализируемых в ходе распознавания в апертуре, что связано с возможным увеличением размеров апертуры при поиске следующей особенности. Обычно затруднения с поиском следующей особенности возникают в виртуальном режиме при “встрече” с границей распознаваемого изображения.

Поскольку изображение матрицы, создаваемое профилометром, имеет сильно зашумленные участки, то перед проведением распознавания программа о.о.с. осуществляет сглаживание. Сглаживание позволяет повысить вероятность правильного распознавания и точность определения координат мембраны. Сглаживанию подвергается копия анализируемого участка поверхности, последующее вычисление средней яркости осуществляется только по оригинальному изображению.

Шероховатость поверхности матрицы существенно выше по краям элементов и.к.-приемников, что связано с неидеальностями и неоднородностями, возникающими в ходе проведения микролитографических операций. Высокая ше-

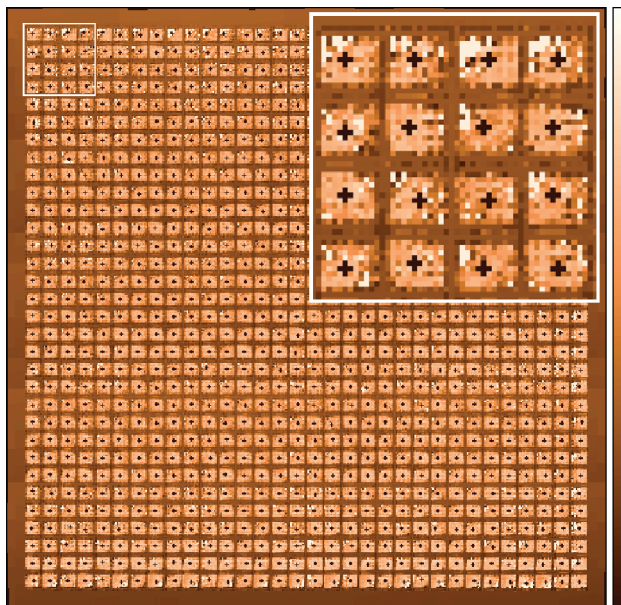


Рис. 3. Результат распознавания и.к.-матрицы программой о.о.с. Изображение поверхности собрано из отдельных фрагментов (сегментов). Распознанные элементы матрицы (мембраны) помечены знаком "+". На время распознавания черные точки заменены на белые.

роховатость на сильнонаклоненных участках позволяет хотя бы небольшой части падающего света отражаться обратно в объектив профилометра, делая сильнонаклоненные участки частично видимыми [6]. Невидимые профилометром точки поверхности условно изображаются черным цветом, который символизирует практически полное отсутствие полезного сигнала (шум регистрирующей системы профилометра). Высокая шероховатость на горизонтальных участках только ухудшает изображение, так как много света рассеивается в различных направлениях и только часть падающего на поверхность пучка попадает обратно в объектив профилометра. На участках с высокой шероховатостью, особенно в режиме вертикальной сканирующей интерферометрии высокого разрешения, часто можно наблюдать отдельные яркие точки рельефа, высота которых существенно превосходит высоту соседних точек. Как правило, такие точки не соответствуют точкам физической поверхности и являются артефактом, вносимым прибором.

На рис. 3 показан результат работы программы о.о.с. — изображение матрицы, собранное из отдельных фрагментов (сегментов). Для правильного распознавания черные точки были временно заменены на белые. Поскольку фрагменты частично перекрываются, а относительные координаты между ними точно определены программой о.о.с., то реконструированное изображение ни-

чем не отличается от исходного. Исходным служило изображение на рис. 2, число точек в котором посредством интерполяции было уменьшено с 1738×1717 до 435×433 . Число точек было уменьшено с целью повышения производительности о.о.с. На текущем этапе разработки некоторая потеря точности, связанная с уменьшением числа точек анализируемого изображения, не критична.

На рис. 3 распознанные элементы матрицы — мембраны — помечены знаком "+". Как видно из рисунка, все элементы матрицы распознаны. Вместе с выходными данными программа о.о.с. создает файл-отчет, в котором приводится подробная сопроводительная информация по режимам и параметрам проведенного виртуального сканирования. Там же даны сгенерированные программой о.о.с. рекомендации оператору по возможному изменению режимов и параметров с целью оптимизации последующих прогонов программы.

Особенность-ориентированное сканирование позволяет в автоматическом режиме собирать статистическую информацию, характеризующую измеряемую поверхность. При виртуальном сканировании и.к.-матрицы в файл-отчете отображается информация о среднем расстоянии между мембранами, средних размерах мембран, степени покрытия мембранами поверхности матрицы. Поскольку информация о каждой мембране сохраняется в виде сегмента, то возможен последующий более детальный анализ сегментов, позволяющий определить геометрические параметры и величину отклика, характеризующие каждую мембрану в отдельности. Полученная информация используется для отработки технологии изготовления (контроль размеров), а также может применяться при выходном контроле качества производимых и.к.-матриц (оценка термомеханического отклика).

На рис. 4 показана траектория связывания особенностей в цепочку, которая автоматически строится в процессе о.о.с. Обычно образующаяся траектория связывания внешне напоминает растр. При отсутствии мембран в положенных местах, например в случае и.к.-матриц с дефектами, правильный ход траектории связывания будет нарушен. Методу о.о.с. безразлично, каким образом расположены распознаваемые элементы рельефа, поэтому нарушение порядка в расположении чувствительных элементов в матрице с дефектами не влияет на конечный результат математической обработки. Это означает, что для работы о.о.с. не требуется никакой априорной информации о взаимном расположении чувствительных элементов анализируемой матрицы.

В цепочке, полученной в ходе о.о.с., известны координаты каждой следующей мембраны отно-

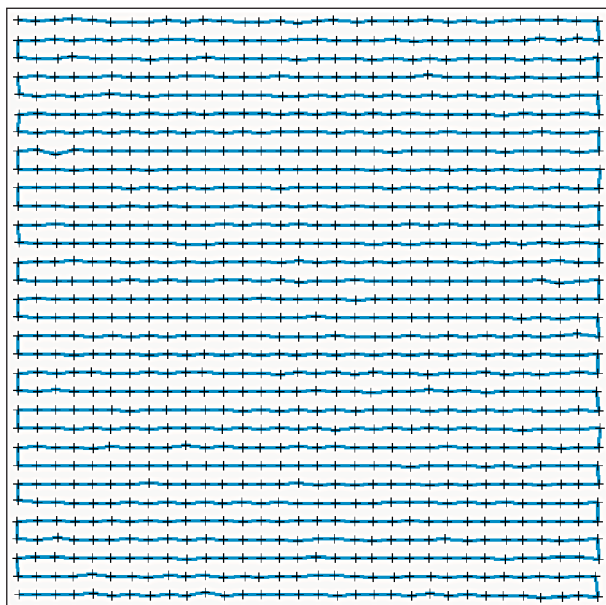


Рис. 4. Похожая на растр траектория связывания особенностей в цепочку. Траектория возникает в ходе виртуального о.о.с. Позиции обнаруженных особенностей (мембран матрицы) отмечены знаком “+”.

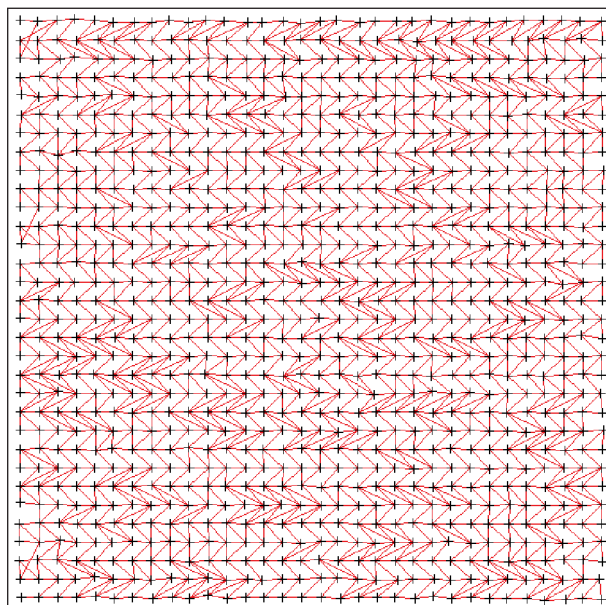


Рис. 5. Траектория “перемещения с.з.м.-зонда” в ходе виртуального о.о.с. (распознавания) оптического изображения и.к.-матрицы. Позиции обнаруженных особенностей (мембран матрицы) отмечены знаком “+”.

сительно положения предыдущей. Кроме того, каждой мембране сопоставлен сегмент — изображение этой мембраны небольших размеров. Располагая данной информацией, можно реконструировать исходное изображение матрицы (см. рис. 3). На рис. 5 показана траектория “перемещения с.з.м.-зонда” от особенности к особенности при виртуальном сканировании (распознавании) оптического изображения и.к.-матрицы. Траектория включает в себя только перемещения “зонда” между особенностями поверхности (мембранами), перемещения в локальных сканах (апертурах и сегментах) не показаны.

На рис. 6 приведено искомое оптическое изображение 32×32 точки, даваемое и.к.-матрицей. Каждая точка изображения (точки имеют квадратную форму) представляет собой отклик соответствующего биматериального и.к.-приемника, представленного на рис. 2. Темным точкам соответствуют приемники с сильно деформированными мембранами. Обычно деформация мембран выражена в изгибе краев и вызвана короблением. Коробление порождается нескомпенсированностью в мембране механических напряжений, возникающих в процессе изготовления прибора.

Искомое изображение построено с помощью адаптированного под рассматриваемую задачу сборщика поверхности. Сборщик поверхности — это специальная программа, входящая в состав пакета о.о.с., которая строит из сегментов реконструированное изображение поверхности. В частности, изображение на рис. 3 было построено с

помощью сборщика поверхности. Адаптация этой программы для построения выходного изображения на рис. 6 состояла в том, что изображение собиралось не из сегментов, а из точек, яркость которых устанавливалась равной средней яркости точек распознанных мембран-зеркал (яркость черных точек игнорировалась).

Основываясь на полученных результатах, можно сделать вывод о том, что программа о.о.с., изначально разработанная для точного измерения рельефа поверхности на с.з.м., вполне пригодна для решения поставленной задачи. Тем не менее, следует отметить несколько системных особенностей функционирования этой программы, которые иногда могут не лучшим образом проявиться в процессе ее работы с и.к.-матрицей. Прежде всего, необходимо учитывать то, что о.о.с. использует особенности поверхности в качестве опорных точек при передвижении по поверхности только для того, чтобы измерить рельеф поверхности в некоторой, заданной оператором области образца. Рельеф поверхности измеряется по частям — небольшими сегментами, в центре которых расположены обнаруживаемые в ходе сканирования особенности поверхности (в нашем случае мембраны и.к.-приемников).

Такой подход позволяет исключить из с.з.м.-измерений ряд погрешностей, в частности: погрешности, вызываемые термодрейфами элементов конструкции микроскопа; погрешности, связанные с ползучестями манипуляторов пье-

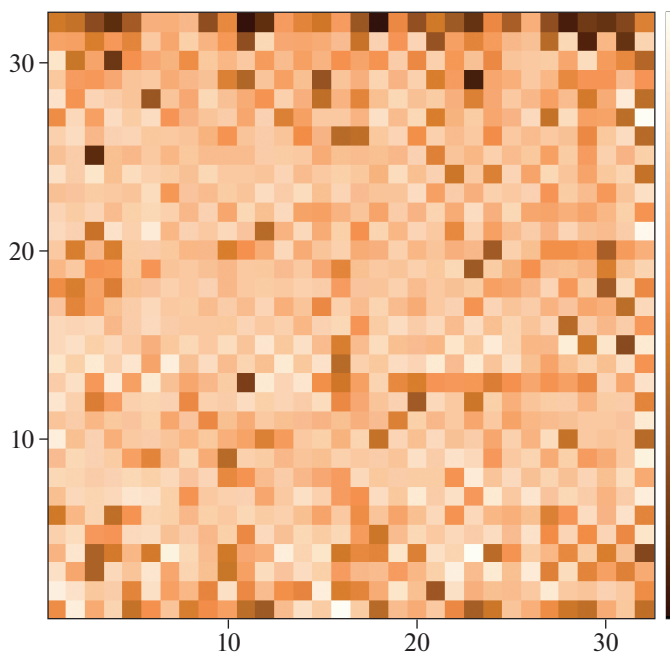


Рис. 6. Искомое оптическое изображение 32×32 точки, даваемое и.к.-матрицей 32×32 при ее равномерной засветке источником и.к.-излучения (модель а.ч.т.) с температурой 50°C . Каждая точка представляет собой отклик соответствующего биматериального и.к.-приемника (точки показаны в виде квадратов). Изображение получено в результате математической обработки по методу о.о.с. Темным точкам соответствуют сильно деформированные мембраны биматериальных и.к.-приемников.

зосканера; погрешности, порождаемые нелинейностью манипуляторов и паразитными взаимными связями между манипуляторами. Кроме того, о.о.с. позволяет существенно ослабить влияние шумов на результаты измерений и заметно улучшить разрешение прибора. Понятно, что большая часть задач, решаемых о.о.с. в с.з.м., неприменима к математической обработке и.к.-матриц, и в этом смысле о.о.с. обладает определенной функциональной избыточностью.

Поскольку основная цель о.о.с. состоит в получении слитного неискаженного изображения рельефа поверхности, сборка которого производится из отдельных фрагментов, то о.о.с. безразлично, каким конкретно особенностям принадлежат отдельные сегменты, важно только, чтобы не было разрывов между соседними сегментами после их наложения. Поэтому по мере сканирования программа может не использовать некоторые особенности, попадающие на ее пути, если при этом результирующее изображение может быть собрано без разрывов. Поскольку в нашей задаче особенностями поверхности, которые программа о.о.с. использует в качестве опорных, являются мембраны-зеркала чувствительных элементов, то

в определенных ситуациях некоторые мембраны могут оказаться пропущенными программой.

Как правило, местами пропуска особенностей являются значительные дефекты матрицы. В этом случае требуется дополнительная подстройка программы. Под значительными дефектами здесь понимается как полное отсутствие одного или нескольких чувствительных элементов, так и сильное механическое повреждение (разрушение) чувствительного элемента или очень сильное его коробление.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отличительным свойством программы о.о.с. является то, что для ее работы не требуется никакой априорной информации о расположении особенностей (мембран чувствительных элементов). Кроме того, программа о.о.с. позволяет в автоматическом режиме собирать статистическую информацию, характеризующую и.к.-приемники матрицы, что важно при анализе экспериментальных результатов, отработке технологии изготовления матрицы и при выходном контроле матрицы.

При равномерной засветке матрицы и.к.-излучением, например, от протяженной излучающей площадки модели абсолютно черного тела полученный массив сигналов выходного изображения может использоваться для коррекции неодинаковой термомеханической чувствительности элементов матрицы. Информация о чувствительности каждого элемента может сохраняться в памяти и.к.-камеры и затем учитываться при обработке каждого кадра. Неодинаковость откликов биматериальных и.к.-приемников связана со всегда имеющим место технологическим разбросом размеров, различиями в составе и структуре используемых материалов, неоднородностью методов обработки по поверхности пластины и т.п.

Поскольку точное расположение мембран в матрице известно априори (задается на стадии конструирования), то указанная выше универсальность алгоритма не так важна при обработке изображений матриц, прошедших выходной контроль. Учитывая, что платой за универсальность является быстроедействие программы, на следующем этапе работ предполагается создание специализированной программы обработки оптического изображения. Такая программа будет значительно менее универсальной, чем применяемая сейчас программа о.о.с., но зато гораздо более производительной, что обеспечит возможность ее встраивания в микроконтроллер серийного прибора.

Авторы выражают благодарность А.М. Белину за обсуждения и помощь, оказанную при проведении измерений, В.И. Золотареву и Г.А. Рудакову за изготовление экспериментальных образцов биматериальных и.к.-приемников.

Работа выполнена в МИЭТ при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, государственный контракт № 14.430.12.0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Datskos P.G., Lavrik N.V., Rajic S.* // Rev. Sci. Instrum. 2004. V. 75. № 4. P. 1134; doi 10.1063/1.1667257
2. *Hunter S.R., Maurer G.S., Simelgor G., Radhakrishnan S., Gray J.* // Proc. SPIE "Infrared Technology and Applications XXXIII" / Ed. by B.F. Andresen, G.F. Fulop, P.R. Norton. 2007. V. 6542. P. 1; doi 10.1117/12.726316
3. *Хафизов Р.З., Фетисов Е.А., Лапшин Р.В., Кириленко Е.П., Анастасьевская В.Н., Колпаков И.В.* // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 4. С. 520. (публикация доступна на сайте www.niifp.ru/staff/lapshin/)
4. *Рыгалин Д.Б., Фетисов Е.А., Хафизов Р.З., Золотарев В.И., Решетников И.А., Рудаков Г.А., Лапшин Р.В., Кириленко Е.П.* // Известия вузов. Электроника. 2013. № 3. С. 60. (публикация доступна на сайте www.niifp.ru/staff/lapshin/)
5. *Serry F.M., Stout T.A., Zecchino M.J., Ragan C., Browne P.A.* 3D MEMS metrology with optical profilers. Veeco Instruments Inc. Tucson, USA, 2006. P. 1.
6. *Novak E.* Low-noise interferometry enables characterization of steep and rough surfaces. Veeco Instruments Inc. Tucson, USA, 2008. P. 1.
7. *Schmit J., Creath K., Wyant J.C.* Optical shop testing / Ed. by D. Malacara. 3rd edition. John Wiley & Sons Inc., 2007. Ch. 15. P. 667; doi 10.1002/9780470135976
8. *Lapshin R.V.* // Nanotechnology. 2004. V. 15. P. 1135; (публикация доступна на сайте www.niifp.ru/staff/lapshin/); doi 10.1088/0957-4484/15/9/006
9. *Lapshin R.V.* Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology / Ed. by H.S. Nalwa. USA. American Scientific Publishers, 2011. V. 14. P. 105. (публикация доступна на сайте www.niifp.ru/staff/lapshin/). ISBN 1-58883-159-0.