

Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В. КЕЛДЫША
Российской академии наук

М.В. Меженный, В.А. Гребенников,
Е.Б. Кульбацкий

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАКРОНАПРЯЖЕНИЙ
В КРЕМНИЕВЫХ ДЕТАЛЯХ

Москва 2007

THE AUTOMATED FACILITIES FOR MEASUREMENT OF THE MACROSTRESSES IN SILICON DETAILS

M.V.Mezhenny, V.A.Grebennikov, E.B.Kulbatsky

Keldysh Institute of Applied Mathematics,
Russia Academy of Sciences,

Moscow

Abstract

The present paper describes the way of macrostresses measurements by polarized-optical method based on application of electrooptic modulator – jack; description of automated facility for stresses measurements in monocrystalline materials transparent for short infra-red radiation and the examples of it's application for control of micromechanical systems.

Аннотация

В настоящей работе представлены: методика измерения макро-напряжений поляризационно-оптическим методом с применением электрооптического модулятора-компенсатора; описание автоматизированного комплекса измерения напряжений в монокристаллических материалах прозрачных для ближнего инфракрасного излучения и примеры его использования для контроля микромеханических систем.

Монокристаллический кремний обладает при комнатной температуре малой величиной пластической деформации и «жесткими» ковалентными межатомными связями. Это позволяет использовать кремний при изготовлении различных микромеханических устройств, в которых требуются стабильные механические свойства и сохранение геометрических параметров в процессе эксплуатации. При изготовлении микромеханических устройств из монокристаллического кремния крайне необходимо располагать данными о напряженно-деформированном состоянии исходной кремниевой пластины и полученных из нее деталей и сборочных единиц. Это вызвано как экономическими соображениями и необходимостью совершенствования технологии изготовления, так и жесткими требованиями к эксплуатационным параметрам микромеханических устройств.

Задача получения информации о напряженно-деформированном состоянии сводится к выбору соответствующей методики измерения остаточных напряжений и контрольно-измерительной аппаратуры, позволяющей, в зависимости от поставленных целей, проводить с требуемой погрешностью массовый или выборочный постадийный контроль кремниевых пластин и деталей. Авторами работы [1] рассмотрены три группы методов измерения напряжений: рентгеновские методы, методы с использованием комбинационного рассеяния и поляризационно-оптические методы на основе эффекта фотоупругости. Эти методы обладают различными пределами чувствительности. Для рентгеновских методов предельная чувствительность составляет – 0.02 kg/mm^2 , для Фурье-спектрометра – 2.0 kg/mm^2 , для поляризационно-оптических – 0.001 kg/mm^2 .

С точки зрения производителя наибольшего внимания заслуживает поляризационно-оптический метод, модификация которого с применением электрооптического модулятора-компенсатора позволяет достичь высокой экспрессности при сохранении хорошего пространственного разрешения [2,3]. Кроме того, данный метод наиболее прост с точки зрения использования потребителем и обладает наименьшей стоимостью.

Деформация конструкции чувствительных элементов микромеханических устройств из монокристаллического кремния обусловлена целым рядом факторов, главными из которых являются собственно процессы изготовления полупроводниковых устройств и методы поверхностного монтажа для коммутации электрических соединений.

Поэтому получение информации на каждой стадии технологического цикла и соответствующая идентификация с конкретной конструкцией исследуемой детали позволяет выявлять некачественные изделия.

В настоящей работе приводятся методика измерения макронапряжений поляризационно-оптическим методом с применением электрооптического модулятора-компенсатора, описание автоматизированного комплекса измерения напряжений в монокристаллических материалах прозрачных для ближнего ИК-излучения и примеры его использования для контроля микромеханических систем [4,5].

Автоматизированный измерительный комплекс ИК-200¹ предназначен для количественного измерения макронапряжений в монокристаллических материалах, а также для определения характера распределения макронапряжений в монокристаллических пластинах и может быть использован при изготовлении микромеханических кремниевых датчиков давления, датчиков ускорения, электронных схем и при производстве полуфабрикатов из полупроводниковых монокристаллов и соединений деталей из стекла и монокристаллического кремния.

Блок-схема автоматизированного комплекса представлена на рис. 1.

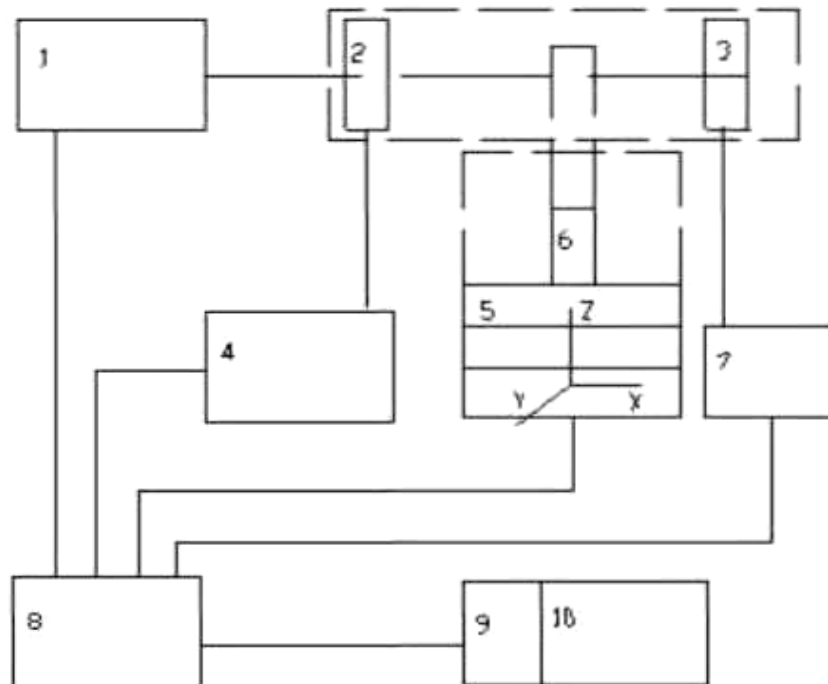


Рис. 1

¹ Комплекс ИК-200 разработан Институтом прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, ОАО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро» и ООО «Растр-Технология»

Комплекс выполнен в стационарном варианте по модульному принципу и включает: 1. лазерный излучатель, генерирующий монохроматический пучок с длиной волны $\lambda = 1.15 \text{ мкм}$; 2. модулятор-компенсатор; 3. фотодиод; 4. блок трансформатора и генератора; 5. трёхкоординатный стол с шаговым приводом; 6. устройство для крепления образца или детали; 7. селективный усилитель; 8. блок электронного управления и электропитания оптического модулятора; 9. блок системы измерения и обработки информации (АЦП/ЦАП); 10. персональный компьютер.

Монохроматический плоскополяризованный луч ИК-излучения, выходящий из лазера, преобразуется в излучение с эллиптической поляризацией и модулируется по частоте для получения гармоник определенной частоты модуляции с постоянной Δ_k и переменной $\Delta_m \sin(\Omega t)$ разностью фаз. Лазерный луч (диаметр луча 10 мм, мощность 8 мВт) фокусируется на поверхность измеряемого образца. Диаметр фокусируемой точки на поверхности образца составляет 0.5 мм. После прохождения излучения через образец и анализатор, и излучение собирается с помощью системы линз и фокусируется на поверхность активного элемента фотодиода с наведенной разностью фаз Δ_0 , образовавшейся при прохождении излучения через анализируемую деталь. С фотодиода излучение поступает в селективный усилитель, где оно фильтруется и усиливается.

Для модулирования пучка и формирования сигнала тестирования предназначен блок, содержащий высоковольтный трансформатор с высокочастотным генератором.

Блок электронного управления используется для дополнительной фильтрации и обработки выделенного электрического сигнала и сигнала тестирования. Оба сигнала считываются в блок системы измерения и обработки информации (АЦП/ЦАП), анализируются с помощью программного обеспечения и результаты выводятся на экран монитора персонального компьютера

Для позиционирования и последующего сканирования проверяемой детали используется прецизионный координатный стол, управление которым осуществляется с персонального компьютера через блок электронного управления.

Комплекс оснащен пакетом прикладных программ, которые работают в операционной среде Windows и осуществляют управление комплексом, а также выполняют измерение и расчет напряженного

состояния в измеряемой пластине с выводом информации на экран монитора в удобной для оператора форме.

При проведении измерений лазерный луч переводят в состояние с эллиптической поляризацией и дважды модулируют по частоте. Модуляцию светового луча и формирование постоянной разницы фаз осуществляют с помощью электрооптического кристалла модулятора-компенсатора за счет приложения к нему переменного и постоянного электрического напряжения. Вначале высокочастотным сигналом с частотой модуляции $f=4 \text{ kGz}$ формируется гармоника частоты модуляции с разностью фаз Δ , определяемой соотношением

$$\Delta = \Delta_k + \Delta_m \sin(\Omega t) \quad (1),$$

где Δ_k – постоянная (компенсационная) компонента (Δ_k для оптической схемы без анализируемого кристалла равна нулю, при $U_k=0$), $\Delta_m \sin(\Omega t)$ – переменная компонента.

Затем исходная гармоника частоты модуляции плавно модулируется низкочастотным сигналом с $f=50 \text{ Gz}$ и масштабируется тестовым сигналом в диапазонах напряжений 220-4000 V, 220-1000 V, 220-500 V.

Синхронно с измерениями формируют постоянную разность фаз Δ_k с низкочастотной модуляцией. Луч лазера, вышедший из кристалла модулятора-компенсатора, фокусируется на поверхность исследуемого образца или детали с помощью системы линз, для получения требуемого пространственного разрешения.

При прохождении через исследуемый образец лазерный луч с низкочастотной модуляцией приобретает дополнительную (наведенную) разность фаз Δ_0 , вызванную остаточными напряжениями, и собирается на приемной поверхности фотодиода, а затем в виде полного электрического сигнала направляется на селективный усилитель, настроенный на частоту 4 kGz, где выделяется полезный электрический сигнал, соответствующий гармонике частоты модуляции.

Сигнал с селективного усилителя направляется на вход платы усилителей и фильтров блока электронного управления, где выделяется низкочастотный модулирующий сигнал, который направляется на аналого-цифровой преобразователь. Одновременно на аналого-цифровой преобразователь подается через канал платы усилителей и фильтров тестовый сигнал с обмоток тестирования высоковольтного трансформатора. Оба сигнала (низкочастотный и тестовый) счи-

тываются в аналого-цифровом преобразователе и анализируются с помощью программного обеспечения компьютером.

Низкочастотный модулирующий сигнал анализируется на минимум по абсолютной величине, который возникает при равенстве по абсолютной величине компенсационной D_k и наведенной D_0 разности фаз, но обратных по знаку (т.е. $\Delta_k = -\Delta_0$). А тестовый сигнал (мгновенное напряжение U_k на обмотках тестирования высоковольтного трансформатора) анализируется на равенство минимальному значению низкочастотного модулирующего сигнала с фотодиода. Эта величина мгновенного напряжения U_k является функцией остаточных напряжений в кристалле. Расчет остаточных напряжений для каждой точки поверхности образца выполняется с помощью программного обеспечения по формуле (2) из работы [6]

$$\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\Delta_0\lambda}{2hC} \quad (2),$$

где $\Delta\sigma$ – разность главных напряжений; $\sigma_1 - \sigma_2$ – главные напряжения, действующие на гранях элементарного параллелепипеда, «выделенного» в окрестности области измерения (область пространственного разрешения установки). Направления главных напряжений совпадают с кристаллографическими направлениями с низкими индексами и зависят от ориентации исследуемого кристалла относительно луча света.

Δ_0 – измеренная разность фаз, вызванная наличием напряжений в образце, представима в виде

$$\Delta_0 = -\pi(U_k - U_0)/(U_{\lambda/2} - U_0), \quad (3)$$

где U_k – напряжение, соответствующее моменту компенсации разности фаз, измеряемое на кристалле модуляторе-компенсаторе; U_0 – напряжение, при котором наблюдается нулевая разность фаз (т.е. без образца); $U_{\lambda/2}$ – напряжение, соответствующее наведенной разности фаз $\lambda/2 = \pi$; $\lambda = 1.15 \text{ мкм}$ – длина волны используемого свет; $C = 1.71 \cdot 10^{-6} \cdot \text{см}^2/\text{кг}$ – фотоупругая постоянная, зависящая от кристаллографической ориентации исследуемого кристалла относительно луча света; $h = 0.35 \text{ мм}$ – толщина образца.

Полученное значение остаточного напряжения для данной точки фиксируется в памяти компьютера и выводится на экран монитора. Одновременно с анализом и обработкой поступающей информации, программные средства через плату управления шаговыми двигателя-

ми блока электронного управления задают траекторию движения координатного стола с образцом или деталью и управляют обмотками тестирования и масштабирования высоковольтного трансформатора низкой частоты. При пошаговом перемещении координатного стола с образцом на экране монитора формируется карта напряженного состояния образца в плоскости перпендикулярной направлению распространения луча.

Специальные функции программного обеспечения позволяют переводить данные измерений в другие форматы (M Word, M Excel) и выполнять постпроцессорный анализ напряженного состояния исследуемого объекта.

Результаты измерений в кремниевой пластине, представленной на рис. 2, иллюстрируют возможности разработанного комплекса. Для изготовления кремниевых емкостных сенсоров давления, датчиков ускорения применяются упругие элементы с плоской диафрагмой из монокристаллического кремния различной формы и сечения, сформированной анизотропным травлением, например, в КОН. При проектировании таких сенсоров необходимо знать распределение механических напряжений по упругому элементу

Исследования по изучению напряженного состояния в таких датчиках особенно важны при производстве микромеханических датчиков, в которых используется лазерная сварка. Распределение и величина механических напряжений вблизи «точек» лазерной сварки в таких датчиках являются критическими, поскольку могут оказывать непосредственное влияние на их долговечность и стабильность. Кроме того, процесс воздействия лазерного излучения при сварке на материал датчик плохо поддается математическому моделированию, что делает невозможным предсказать напряженное состояние критических элементов.

Проиллюстрируем это на примере датчика, который представляет собой стеклянную пластинку толщиной 1 mm и размером $1 \times 1 \text{ см}^2$ (стекло марки ЛК-5), к которой приварен кремниевый кристалл с соответствующей структурой датчика. Размер кремниевого кристалла составляет примерно $0.025 \times 0.5 \times 0.5 \text{ см}^3$. Кремниевый кристалл своей центральной частью приварен к стеклу диффузионной сваркой, таким образом, что по периметру у него остается ободок шириной $\sim 1 \text{ мм}$, не сваренный со стеклом. Схема этого датчика приведена на рис.2. Точками 1 и 2 отмечено направление сканирования данного

датчика в рентгеновской установке с целью определения напряжений в приваренном кремниевом кристалле.

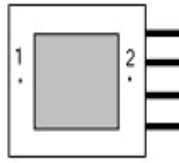


Рис.2

На рис. 3 представлено распределение интенсивности дифракционного отражения (400) рентгеновского $\text{MoK}\alpha$ -излучение от кремниевом кристалла. По оси абсцисс отложен угол ω углового сканирования исследуемого образца относительно луча. Представленная картина качественно характеризует распределение напряжений в структуре кремний-стекло. Увеличение интенсивности рентгеновского излучения позволяет судить о повышенных напряжениях на краях кремниевом кристалла вблизи точек 1 и 2 (обозначены на рис.2).

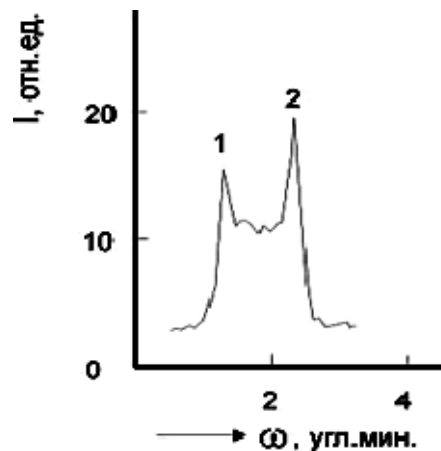


Рис.3

На рис. 4 представлено распределение напряжений в плоскости кремниевом кристалла в исследованном датчике, полученное с помощью разработанного автоматизированного измерительного комплекса ИК-200. Видно, что полученные результаты хорошо совпадают как с расчетными величина, так и с характером распределения напряжений, полученными по рентгеновским данным.

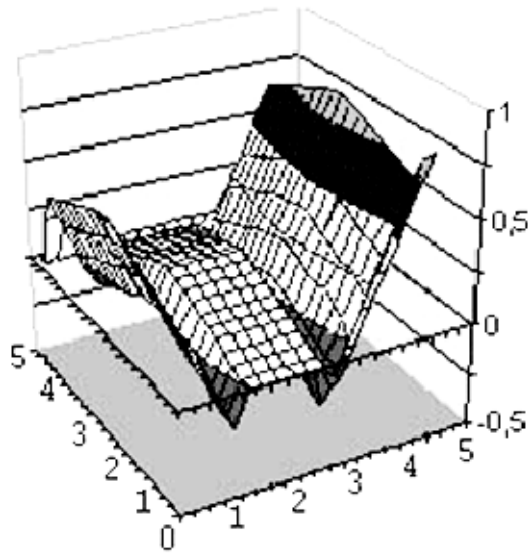


Рис.4

Анализ полученных данных говорит о том, что в целом в пластине кремния напряжения не превышают $\sim 0.05 \text{ kg/mm}^2$, в то время как в зоне лазерного воздействия наблюдаются участки с напряжениями $\sim 3 \text{ kg/mm}^2$ и в окрестности зоны воздействия $\sim 0.1 \div 0.3 \text{ kg/mm}^2$.

Таким образом, разработанный комплекс позволяет получить величины и распределение напряжений в исследуемом образце с высокой точностью, достоверностью и экспрессностью по сравнению с другими методами.

Заключение

1. Разработан и запатентован автоматический измерительный комплекс, позволяющий анализировать распределение напряжённого состояния в монокристаллических материалах прозрачных для видимого и ближнего ИК-излучения.

2. Возможности комплекса проиллюстрированы на примере технологических обработок, применяемых при изготовлении микромеханических систем.

Литературы

1. Концевой Ю.А., Литвинов Ю.М., Фаттахов Э.А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур. - М., Радио и связь, 1982г.-240с.
- 2 Захаров С.Н., Крутогин Д.Г., Пономарев Н.М., Савушкина Н.И. Разработка метода количественного определения напряжений в пластинах монокристаллов гадолиний-галлиевого граната. Сб. "Исследование процессов получения редких и редкоземельных металлов и их соединений"; М., Гиредмет, 1989г., с.111-120.
3. Установка для контроля параметров внутренних напряжений в полупроводниковых структурах SDS-150. Российский НИИ «Электронстандарт», www.elstandart.spb.ru/rus/prod/sds_150.html.
4. Гребенников В.А., Меженный М.В., Кульбацкий Е.Б., Ефанов А.А. Измерение макронапряжений в кремниевых образцах поляризационно-оптическим методом с помощью автоматизированного измерительного комплекса ИК-200. "Лазерные технологии и средства их реализации". Материалы IV международной научно-технической конференции. Изд-во СПбГПУ, 2004. с.170-171.
5. Гребенников В.А., Кульбацкий Е.Б., Меженный М.В. и др. Способ и установка для определения остаточных напряжений в монокристаллических материалах поляризационно-оптическим методом - Патент РФ №2240501, заявка № 2002127722/28(029386) от 17.10.2002г
6. Нарасимхамурти Т. Фотоупругие и электрооптические свойства кристаллов. М., Мир, 1984г. 622с.