

Key words: microelectronics, nanoelectronics, radioelectronics, nanocrystal, barium, cobalt, ion implantation, annealing, automation, information technology, electron microscopy, Auger peaks, material, MIS structure.

Parmankulov Isamiddin Pattaevich

The Research of Nanocrystals of Silicide Metals

The statistical results of the nanocrystals of metal silicide's research obtained by irradiating a silicon surface with barium and cobalt ions energy from 0.5 to 5 KeV and a dose

of 10^{16} to 10^{17} cm^{-2} , followed by annealing at a temperature range from 900 K to 1400 K for 30 minutes are described in the article. Moreover, it is shown that the obtained nanofilms of cobalt silicide can be used as material for the manufacture of nanoelectronics devices.

Key words: microelectronics, nanoelectronics, radioelectronics, nanocrystal, barium, cobalt, ion implantation, annealing, automation, information technology, electron microscopy, Auger peaks, material, MIS structure.

УДК:620.179:681.787

К.П.Абдурахманов, З.Т.Азаматов, И.А.Кулагин, В.И.Редкоречев

ИНТРОСКОПИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН

В работе проведены исследования по развитию методов интроскопии полупроводниковых пластин с использованием когерентного и некогерентного излучения. Представлены теоретические основы методов и разработанное экспериментальное оборудование. Описана методика анализа дефектов в поле некогерентного излучения на основе сравнения с эталонным образцом. Представлена развитая методика контроля крупномасштабных неоднородностей, основанная на анализе восстановленных интерферограмм в процессе остывания полупроводниковой пластины. Интерферограммы восстанавливались на основе сравнения голограмм, полученных при освещении когерентным источником излучения. Представлена методика определения дефектности кремниевых пластин, основанная на сравнительном анализе Фурье образов голографических интрограмм.

Ключевые слова: полупроводниковые пластины, дефекты, интроскоп, голографическая интерферометрия.

I. Введение

При создании микроэлектронных приборов все возрастающую роль приобретает развитие различных методов (в том числе экспресс-методов) неразрушающей диагностики и контроля на всех технологических этапах их производства: контроль исходных материалов, полуфабрикатов и готовых изделий, а также анализ причин отказов, возникающих в процессе испытаний и эксплуатации. Это обусловлено, в частности, тем, что в процессе эксплуатации полупроводниковых приборов при их отказе расходы на их восстановление более чем на порядок превышают расходы при их изготовлении [1]. Для локальной диагностики используются различные методы, наиболее приемлемыми и универ-

сальными среди которых являются электронно-зондовые и оптические зондовые методы [2-4]. По сравнению с электронно-зондовыми методами оптическая диагностика позволяет визуализировать объемные электрически нейтральные дефекты, такие как кислородные и металлические преципитаты, дефекты упаковки, дислокации, линий скольжения и пустоты в пластинах кремния, арсенид галлия, германия и в изделиях на их основе, а также визуализировать существующие в них различные микрополя. Значительная глубина проникновения ИК-излучения в полупроводниковых материалах в сочетании с регистрацией сигналов-откликов различной физической природы позволяет реализовать комплексную диагностику микроэлектронных изделий и материалов с применением

компьютерной и аппаратурной томографии.

С развитием различных приемников изображения информация в этом случае может быть представлена в виде двумерных картин. При анализе подобной информации возникает ряд сложных проблем, связанных с ее распознаванием и определением дефектов, в частности, таких как обработка спекл-структуры; выделение областей интрограммы, представляющих интерес, определение особенности изображения дефектов; снижение влияния факторов, влияющих на формирование изображения (различие углов засветки и наблюдения, степени освещенности и т.п.) Очевидно, что применение компьютерной обработки экспериментальных данных при соответствующем программном обеспечении существенно облегчает данную задачу [5]. Для решения подобного рода ряда задач используется Фурье-анализ, когда контраст изображения рассматривается как некий сигнал, обладающий определенными пространственными спектральными характеристиками, и нелинейное преобразование цветовых и яркостных составляющих изображения.

Таким образом, для визуализации и анализа дефектности и структуры изделий микроэлектроники большую важность приобретает задача создания многофункционального оборудования и технологии диагностики физических особенностей отображения различных дефектов и элементов в полупроводниковых кристаллах и применение полученных результатов для решения научных и практических задач. В настоящей работе представлены исследования по развитию методов интроскопии полупроводниковых пластин с использованием когерентного и некогерентного излучения.

II. Основная часть

Теоретические основы

Ширина запрещенной зоны кремния при комнатной температуре равна 1.12 эВ, что соответствует краю фундамен-

тального поглощения излучения на длине волны $\lambda = 1.1$ мкм. Поглощение излучения с большей длиной волны может происходить в результате переходов между уровнями примесей и разрешенными зонами, а также из-за возбуждения экситонов, колебаний решетки и свободных носителей. Таким образом, наличие дефектов и различных примесей приводит к появлению энергетических состояний в запрещенной зоне, и поглощение излучения с $\lambda > 1.1$ мкм может свидетельствовать об их присутствии. При переходе электронов в зону проводимости возможно дальнейшее поглощение инфракрасного излучения, связанное с непрямым переходом зона-зона. Видимое излучение с энергией кванта, большей ширины запрещенной зоны, поглощается полностью в приповерхностном слое полупроводника. В этом случае концентрация электронов в зоне проводимости в приповерхностной области существенно возрастает, что приводит к росту поглощения и рассеяния излучения с длиной волны $\lambda > 1.1$ мкм. Таким образом, наличие видимого света в спектре излучения увеличивает поглощение инфракрасной части спектра в приповерхностной области кремниевой пластины. Последнее при контроле качества пластины позволяет оценивать вклад поверхности, что важно, так как в основном приповерхностный слой определяет электрофизические свойства интегральных схем. Таким образом, при наличии широкого спектра излучения, включающего видимую и ближнюю ИК области спектра, можно оценить объемную и поверхностную составляющие поглощения и определить структурно-примесное состояние объема и поверхности пластины.

Наряду с поглощением важную информацию о состоянии объекта может нести и изменение фазы излучения, прошедшего через кремниевую пластину. Анализ фазы излучения позволяет извлекать информацию о состоянии фазовых объектов, связанных с локальным

изменением показателя преломления. Измерение фазы можно реализовать голографическими методами. В процессе записи мультиплексной цифровой голограммы исследуемый трехмерный объект размещается на расстоянии d от видеокамеры и освещается измерительной волной когерентного источника излучения. Отраженная объектом волна складывается с опорной волной, и интенсивность оптического поля регистрируется при помощи цифровой камеры. В результате получают цифровую голограмму, содержащую информацию об объекте. Распределение интенсивности $I(x,y)$ в плоскости записи голограммы (x,y) определяется квадратом модуля суммы комплексных амплитуд объектной $O(x,y)$ и опорной $R(x,y)$ волн, а именно

$$I(x,y) = |R(x,y)|^2 + |O(x,y)|^2 + R(x,y)O^*(x,y) + R^*(x,y)O(x,y) \quad (1)$$

Последние два члена уравнения (1) содержат информацию, соответствующую амплитуде и фазе объектной волны. При реконструкции изображения записанная голограмма, т.е. записанное распределение интенсивности $I(x,y)$, может рассматриваться как пропускающий транспарант, на котором “дифрагирует” виртуальная опорная волна $R(x,y)$. Для получения искомой отраженной объектной волны в цифровой голографии применяется численный расчет распространения оптического поля в форме произведения $R(x,y)I(x,y)$ от плоскости голограммы (x,y) до плоскости восстановления изображения объекта (ξ,η) . Численное восстановление изображения объекта из записанной цифровым образом голограммы традиционно можно провести в соответствии со скалярной теорией дифракции в приближении Френеля для интеграла дифракции Рэлея-Зоммерфельда [6,7]. В этом случае можно показать, что восстановление поверхности записанного трехмерного фазового объекта возможно как с использованием цифровой техники при решении задачи на компьютере, так и

оптическими методами. В обоих случаях реализуется решение интегрального уравнения первого рода.

Записанная цифровая голограмма представляет собой матрицу оцифрованных значений интенсивности, аналогичную матрице цифровых значений, получаемых цифровой камерой при записи цифровых голограмм в видимом диапазоне, т.е. матрицу значений, из которой программной обработкой восстанавливается трехмерная картина фазы излучения, прошедшего через исследуемый образец. С помощью метода Френеля-Кирхгофа распределение фазы может быть получено в любом сечении образца, что дает информацию о глубине расположения дефектов. Применение методов цифровой интерферометрии позволяет получать разрешение по глубине $\lambda \times h$, где λ - длина волны, h - шаг оцифровки. Например, при $\lambda=1\text{мкм}$ и $h=1/256$ (8ми битовая оцифровка) точность определения расположения дефекта по глубине составит ~ 4 нм.

При наличии точечного источника опорной волны или линзы, т.е. когда ширина спектра пространственных частот определяется только угловыми размерами, для реконструкции цифровой голограммы, представляющей собой трехмерный массив данных $A'VB'D$, где $A'B$ - размер приемного элемента в пикселах, а D - индекс дискретизации данных каждого пиксела (определяется возможностями как обрабатывающего компьютера, так и приемного элемента) может быть использована компьютерная симуляция сходящегося опорного пучка, либо симуляция линзы, разделяющей изображения в фокальной плоскости. В цифровой интерпретации для достижения результата достаточно применить двумерное Фурье-преобразование к зарегистрированному массиву. В этом случае размер массива по поперечным координатам x,y равен $A'B$, амплитуда $A(x,y)$ равна амплитуде записи изображения.

После прямого Фурье преобразо-

вания массива:

$$F(k_x, k_y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{\infty} A(x, y) \exp(-i(k_x x + k_y y)) dx dy \quad (2)$$

получается Фурье спектр голограммы с четырьмя локализованными спектрами пространственных частот, которые соответствуют членам уравнения (1). Первые два члена образуют нулевой порядок спектра, который локализован в центре двумерной Фурье плоскости. Третий и четвертый члены уравнения (1) образуют два сопряженных спектра, локализованных симметрично относительно центра и соответствуют комплексной амплитуде объектной волны. Таким образом, осуществление прямого преобразования Фурье позволяет выделять на полученном пространственном спектре наиболее информативную область. После выделения (отфильтровать) одной из областей локализованного спектра и использования обратного Фурье преобразование:

$$A_f(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} F(k_x, k_y) \exp(i(k_x x + k_y y)) dk_x dk_y \quad (3)$$

можно получить распределение комплексной амплитуды $A_f(x, y)$. Проводя анализ этой комплексной амплитуды, можно восстановить фазовый фронт объектной волны (реальный или сопряженный в зависимости от выбранной области фильтрации) в плоскости изображения объекта:

$$j(x, y, z_i) = \arctg \frac{\text{Im}[A_f(x, y, z_i)]}{\text{Re}[A_f(x, y, z_i)]} \quad (4)$$

здесь z_i обозначает, что фаза определяется на определенном расстоянии от голограммы.

Задача интерферометрического сравнения для двух известных массивов распределения фазы $j_j(x, y, z_i)$ предельно проста – надо получить распределение разности фаз:

$$\Delta j(x, y, z_i) = j_1(x, y, z_i) - j_2(x, y, z_i) \quad (5)$$

Это легко достигается простым попиксельным вычитанием одного массива из другого. Получаемое при этом тангенциальное распределение яркости интерференционных полос имеет

разрывы в фазах $\frac{\rho}{2} + n\pi$. Далее с помощью программы развертывания фазы из разностной интерференционной картины можно восстановить поверхность фазовых изменений между двумя массивами данных. Для восстановления голограмм Френеля применяется аналогичный алгоритм с использованием преобразования Френеля, которое тесно связано с преобразованием Фурье. На основе данной методики были разработаны программы восстановления интерферограмм и развертывания фазы для голографических интрограмм.

Экспериментальное оборудование

Основным параметром интроскопов является пространственное разрешение. В определенной степени программы записи и обработки изображений, разработанные для данного интроскопа, также можно отнести к его основным параметрам. Остальные параметры – спектральный диапазон, кадровая частота, поле зрения, поле сканирования, – являются параметрами стандартного оборудования: источников излучения, механических подвижек, фотоприемников. В частности, инфракрасные сканирующие интроскопы позволяют проводить измерения в спектральном диапазоне до нескольких мкм и обладают разрешением от десятков мкм до 10нм (например, [8]).

Нами был разработан экспериментальный интроскоп с пространственным разрешением 5 нм, работающий в спектральном диапазоне до 2 мкм с полем зрения от 400x400 мкм. Фотография интроскопа приведена на рис.1. Оптическая схема приведена на рис.2.

Схема состоит из 2-х каналов лазерного излучения, которые формируются на разделительном клине 2. В

первом канале излучения, отраженного от клина 2, формируется опорный пучок. Во втором канале излучения, прошедшем через клин, формируется объектный пучок. В полном объеме схема работает как голографическая система с разным

увеличением вплоть до увеличения микроскопа. В режиме съемки голограмм Френеля схема позволяет послойно восстанавливать изображение микро-объектов внутри полупроводниковых пластин.



Рис.1. Фотография интроскопа

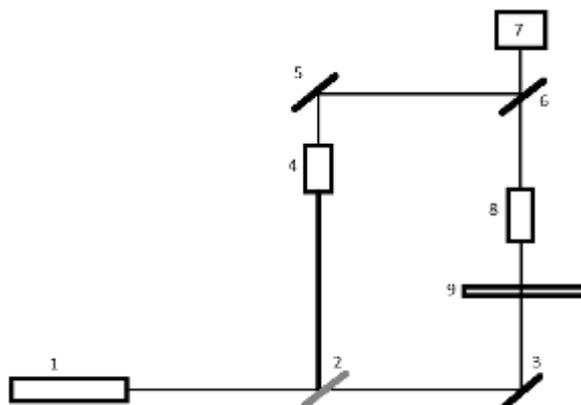


Рис.2. Оптическая схема интроскопа.

1- лазер, 2,6 – оптический клин, 3,5 – зеркало, 4,8 – объектив, 7 – камера, 9 – пластина кремния.

В качестве источника излучения были выбраны следующие устройства: DPSS лазер и лампа накаливания. DPSS лазер представляет собой твердотельный лазер с диодной накачкой, который излучает в ближнем ИК-диапазоне на длине волны 1060 нм. Ширина спектра лазерного излучения менее 2нм. Длина когерентности составляет несколько

метров. Мощность лазера составляла 200 мВт в одномодовом или двухмодовом режимах. Лазер не термостабилизирован, и его основная частота изменяется с нагревом активного элемента. Однако, при съемке цифровых интерферограмм с интервалом десятки секунд изменение частоты со временем практически не сказывается на интерференционной

картине. Также использовалась лампа накаливания мощностью 40 Вт. Излучение лампы содержит в своем спектре широкий инфракрасный диапазон, совпадающий с диапазоном чувствительности Web USB камер.

Механика интроскопа содержала трех координатный оптический столик с точностью подачи 1 мкм по координатам XYZ. Диапазон изменения подачи равен диаметру исследуемых полупроводниковых пластин (100 мм). Плоскость установки пластин имела регулировку наклона.

В качестве приемника излучения использовалась цифровая камера. Также как при выборе остальных элементов интроскопа, при выборе цифровой камеры авторы руководствовались их доступностью. Пространственная разрешающая способность фотоприемника с зарядовой связью (ПЗС) или комплементарного металл-оксидполупроводникового (КМОП) фотоприемника является функцией количества имеющихся в нем пикселей и их размеров, относительно изображения, проецируемого оптической системой микроскопа на поверхность матрицы. Современные матрицы, используемые в научно-исследовательских приборах, содержат от до 5000×5000 пикселей. Тенденция в производстве бытовых и профессиональных ПЗС-камер состоит в непрерывном уменьшении размеров пикселей, благодаря чему сегодня доступны цифровые камеры с пикселями 2×2 микрона. В ограниченных дифракцией оптических приборах, таких, как микроскопы, предел Аббе для оптического разрешения объектива с числовой апертурой 1,4 на средней длине волны видимого диапазона (550 нанометров), составляет 0,20 мкм. Таким образом, пиксел площадью 10 мкм² имеет размер, достаточный для обеспечения необходимого оптического разрешения, а предпочтительным является пиксел с размерами 7×7 мкм. Хотя, меньшие пиксели в ПЗС-фотоприемнике и

улучшают пространственное разрешение, они, при этом, ограничивают динамический диапазон устройства. Для данного интроскопа желательно иметь камеру с большим числом пикселей, т.к. в схемах интроскопа с единичным увеличением большое поле зрения требует матрицы большой площади. Такими матрицами оснащены современные профессиональные фотоаппараты. И основным параметром камеры должен быть диапазон спектральной чувствительности в ближней ИК области. Современные Web USB камеры чувствуют этот диапазон спектра, если у них удалить спектральный фильтр, который обычно устанавливается перед матрицей. Из протестированных сравнительно простых камер была выбрана Web USB камера Defenender 2552-1, позволяющая наряду с видимым излучением обладать чувствительностью в ближней ИК области до 2 мкм, максимальной из всех протестированных камер.

Анализ дефектности пластин в поле некогерентного излучения

В теоретической части было показано, что источник некогерентного излучения, включающего видимую и ближнюю ИК области спектра, может быть использован для анализа электронейтральных дефектов. В этом случае для анализа необходимо использование эталонных образцов. На рис. 3 приведены интрограммы кремневой пластины, полученные при единичном увеличении при использовании удаленного некогерентного источника излучения. Размер интрограммы 3.5×3.5мм. Использовалась дефектная пластина кремния размерами $\text{Æ}100 \times 0.5$ мм со сферическими углублениями. Из представленных интрограмм видно наличие мелких изображений источника излучения - нити лампы накаливания. В процессе записи интрограмм использовались различные нейтральные оптические фильтры. При использовании фильтра, отсекающего

ближнюю ИК область спектра. В этом случае рельеф интрограмм сглаживался. Таким образом, точечные дефекты пластины играют роль микролинз и создают на интрограмме изображения источника излучения на длине волны более 1,1 мкм.

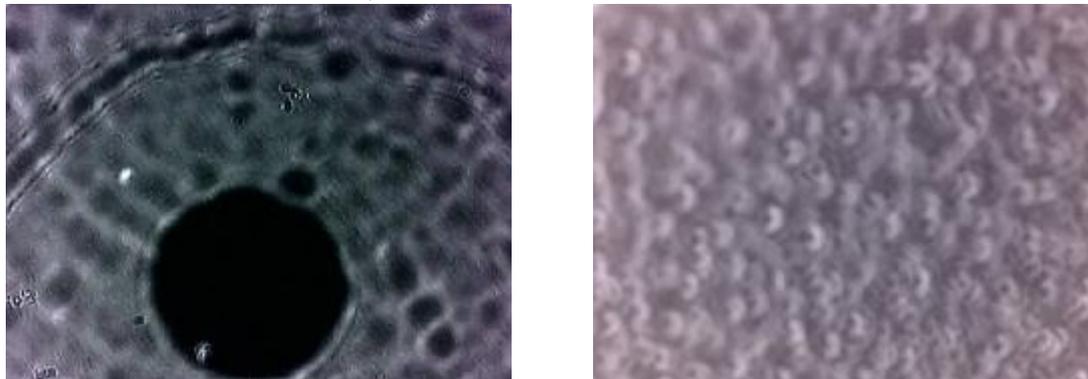


Рис. 3. Интрограммы различных участков кремниевой пластины, записанные при некогерентном освещении

Для повышения точности измерений необходимо использование интрограммы эталонного образца, на основе сравнения с которой целесообразно принимать решение об отбраковке дефектной пластины. Данная методика может быть применима и для экспресс-оценки качества пластины в технологической цепочке производства микросхем.

Крупномасштабные неоднородности кремниевых пластин

В технологическом процессе производства микросхем, включающем в себя технологические работы с кремниевыми пластинами диаметром 100мм, возникает раскалывание микросхем по неопределенным причинам. Рассмотрим разработанную нами технологию поиска крупномасштабных неоднородностей структуры кремниевых пластин, которые могут быть причиной таких раскалываний. Технология основана на методах цифровой голографической интерферометрии. При использовании объектной и опорной волн в плоскости приемника реализуется голографическая интрограмма.

Для испытаний использовались пластины кремния, взятые из технологического процесса производства

Таким образом, продемонстрирована возможность определения внутренних дефектов при использовании излучения с широким спектральным составом.

микросхем. Пластины имели размеры $\approx 100 \times 0,5$ мм. С одной стороны пластины имели серебряное покрытие, с другой - были скрайбированы на квадратики размерами 4,5x4,5мм. Т.е. эта методика может быть использована также после разметки пластин. Для дефектоскопии пластина закреплялась в интроскопе и освещалась лазерным излучением. На расстоянии 1м от пластины устанавливался голографический интерферометр, который снимал голограммы предварительно нагретой до 85С пластины в процессе остывания. Деформации поверхности в процессе остывания пластины фиксировались интерферометром в виде голограмм. На основе сравнения двух голограмм в соответствии с выражением (5) определялось изменение фазы. На рис. 4 показаны интерферограммы остывающей пластины. Цифры под рисунками показывают промежутки времени (в секундах), через которые были получены интерферограммы. Ширина полосы на каждой интерферограмме соответствует изменению фазы излучения на $\pi/2$.

На начальном этапе процесс, с первого взгляда, остывания носит симметричный характер, однако, в дальнейшем видны отклонения от симметрии

связанные в неоднородностью структуры пластины. Так как в данных условиях ширина полосы на интре-ферограмме соответствует пространственному изменению на 0,2 мкм. Излучения на $\pi/2$, выявленные неоднородности имеют

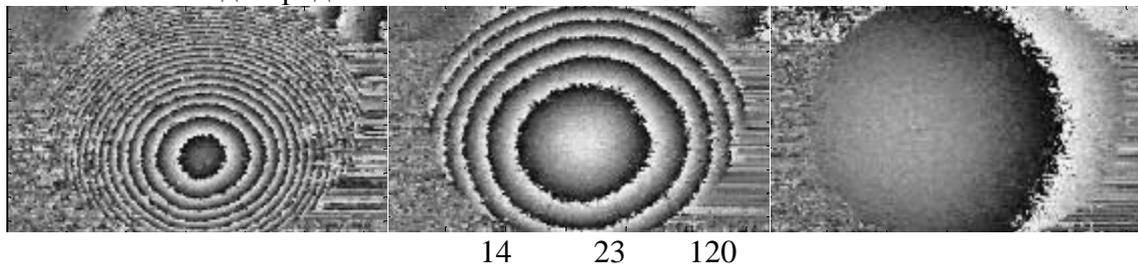


Рис.4 .Интерферограммы остывающей пластины

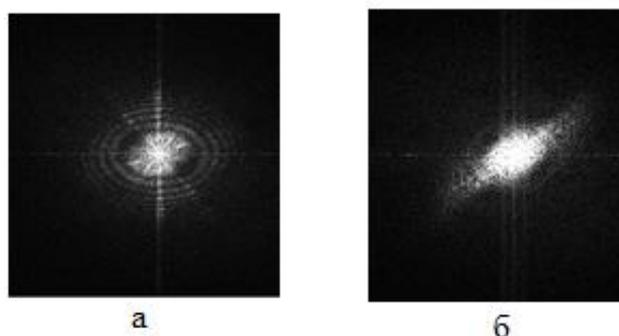


Рис.5. Фурье образы голографических интрограмм, полученных для двух кремниевых пластин

Анализ Фурье образов голографических интрограмм

Проведенные исследования показали, что внутренние точечные дефекты пластины играют роль микролинз и создают точечные изображения. Для получения более полной информации о внутренних дефектах пластин для каждой голографической интрограммы тестируемой пластины, записанной в поле когерентного источника излучения, программным образом строился Фурье образ изображения, рассеянного на дефектах лазерного излучения, который служил критерием дефектности пластины. На рис.5 представлены изображения Фурье образов двух голографических интрограмм кремниевых пластин. Толщина данных пластин, как и прежде, составляла 0,5 мм. Пластина, Фурье образ голографической интрограммы которой представлен на рис.5,а была полирована с одной стороны, тогда как другая пластина была

полирована с двух сторон. масштаб 8-10мкм, что было также видно при исследовании фрагмента площади пластины. Таким образом, разработана технология поиска крупномасштабных неоднородностей кремниевых пластин.

полирована с двух сторон.

Из сравнения рис.5,а и рис.5,б видно, что Фурье образы двух изображений кремниевых пластин значительно отличаются, что служит основой для разработанной методики анализа проявления дефектов кремниевых пластин. Таким образом, сопоставляя Фурье образы голографических интрограмм эталонной полупроводниковой пластины с исследуемой пластиной возможно проведение диагностики. Для компьютерной диагностики возможно сравнение не только самих изображений, но и дескрипторов полученных изображений Фурье образов голографических интрограмм.

III. Выводы

В отличие от ранее развитых интроскопических методов исследований в настоящей работе использовался многоэлементный приемник оптического излучения, а также методы голографической интерферометрии. Получено, что анализ

дефектов в поле широкополосного излучения и отбраковка пластин целесообразна на основе сравнения с эталонным образцом. Развитая методика контроля крупномасштабных неоднородностей основана на анализе восстановленных интерферограмм в процессе остывания предварительно нагретой полупроводниковой пластины. Данная методика также может быть использована после технологического процесса скрайбирования пластин. Методика анализа Фурье образов голографических интрограмм позволяет проводить компьютерную диагностику, тем самым повышая скорость и точность процесса.

Таким образом, проведенные исследования показали перспективность использования рассмотренных методов для диагностики полупроводниковых пластин.

Литература

1. Горлов М.И., Емельянов В.А., Ануфриев Д. Л. Технологические отбраковочные и диагностические испытания полупроводниковых изделий. - Минск: Бел. наука, 2006. – 367 с.
2. Ланин В., Волкенштейн С., Хмыль А. Методы контроля и диагностики скрытых дефектов в изделиях электроники // Компоненты и технологии. – 2010. – Т.103. № 2 - С.137-142.
3. Сенько А.С., Сенько С.Ф., Зеленин В.А. Количественная диагностика поверхностных дефектов полупроводниковых пластин кремния // Микроэлектроника. - 2003. - Т. 32, № 3. - С. 210-218.
4. Воробей Р.И., Гусев О.К., Жарин А.Л., Петлицкий А.Н., Пилипенко В.А., Турцевич А.С., Тявловский А.К., Тявловский К.Л. Контроль дефектов структуры кремний-диэлектрик на основе анализа пространственного распределения потенциала по поверхности полупроводниковых пластин. // Приборы и методы измерений. – 2013. - № 2 (7). - С. 67-72.
5. Дроздов Ю.А., Окунев А.О., Ткаль В.А. Компьютерная обработка рентгенотопографических изображений дефектов структуры монокристаллов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2002. - № 8. - С.6-12.
6. Ferraro P., De Nicola S., Coppola G. Digital holography and three-dimensional display: principles and applications / Т.-С. Poon, ed. - New York: Springer, 2006. – 430 p.
7. Matrecano M., Memmolo P., Miccio L., Persano A., Quaranta F., Siciliano P., Ferraro P. Improving holographic reconstruction by automatic Butterworth filtering for microelectromechanical systems characterization // Applied Optics. – 2015. - V.54. - P. 3428-3432.
8. www.etesters.com/listing/37fb7d1a-1422-08df-aa26-267d4ab676c5/SIRM-300_-_Scanning_Infrared_Microscope

**K.P.Abduraxmanov, Z.T.Aзаматов,
I.A.Kulagin, V.I.Redkorechev**

Introscopy of Semiconductor Plates

In our work, the research on development of the introsopic methods of semiconductor wafers using coherent and incoherent radiations have been carried out. The theoretical bases of methods and developed experimental equipment have been submitted. The technique of the analysis of defects in the field of the incoherent radiation on the basis of comparison with a reference sample has been described. It has been submitted the developed technique of the control of large-scale inhomogeneities based on the analysis of restored interferograms obtained during cooling of the semiconductor wafer. The interferograms were restored on the basis of comparison of the holograms received at illumination by a coherent source of radiation. It is proposed a technique for determining the defectiveness of silicon wafers based on a comparative Fourier analysis of images of holographic intrograms.

Keywords: semiconductor wafers, defects, introscope, holographic interferometry.