

удк 621. 382.8.002

Оценка размеров топографических дефектов полупроводниковых кремниевых структур

Сенько С.Ф., Зеленин В.А.

Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси,
ул. Купревича, 10, г. Минск 220141, Беларусь

Поступила 15.01.2018

Принята к печати 21.02.2018

Влияние неплоскостности полупроводниковых пластин на характеристики изготавливаемых приборов проявляется через расфокусировку изображения топологии формируемой структуры и снижение разрешения при проведении операций фотолитографии. Для качественного контроля неплоскостности широко используется метод *Макуош* топографии, который однако не позволяет получить количественные характеристики наблюдаемых дефектов, что существенно ограничивает его применение. Цель данной работы заключалась в разработке методики расчета размеров топографических дефектов пластин со сформированными на них полупроводниковыми структурами, что позволило установить критерии годности пластин в зависимости от размеров дефектов и проводить их своевременную отбраковку.

В основу разрабатываемой методики расчета положен вывод соотношений, связывающих искажение элементов изображения с кривизной локальных участков полупроводниковой пластины со сформированными на ней структурами. Данные структуры рассматривались как конечные элементы изображения, в пределах которых радиус кривизны поверхности принимался постоянным. Последовательное вычисление отклонения края элементов от идеальной плоскости на основании определения радиуса их кривизны позволило получить геометрический профиль контролируемой поверхности в выбранном ряду элементов. Определены условия формирования изображений и требования к структурам.

Получены аналитические выражения, связывающие величину искажений элементов светотеневого изображения с геометрическим профилем поверхности. Это позволяет проводить оперативный количественный контроль наблюдаемых топографических дефектов как в производственных условиях, так и в исследовательских целях. Приведены примеры расчетов топографических дефектов полупроводниковых кремниевых пластин. Сравнение полученных результатов с данными традиционных методов показало их полную идентичность.

Ключевые слова: полупроводниковые структуры, оптическая топография, количественный контроль, расчет изображений.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-74-84

Адрес для переписки:

Сенько С.Ф.
Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси,
ул. Купревича, 10, г. Минск 220141, Беларусь
e-mail: senkosf@tut.by

Address for correspondence:

Sianko S.F.
Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus
Kuprevich str., 10, Minsk 220141, Belarus
e-mail: senkosf@tut.by

Для цитирования:

Сенько С.Ф., Зеленин В.А.
Оценка размеров топографических дефектов полупроводниковых кремниевых структур.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 1. С. 74–84.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-74-84

For citation:

Sianko S.F., Zelenin V.A.
[Estimation of topographic defects dimensions of semiconductor silicon structures].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 1, pp. 74–84 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-74-84

Estimation of topographic defects dimensions of semiconductor silicon structures

Sianko S.F., Zelenin V.A.

Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Kuprevich str., 10, Minsk 220141, Belarus

Received 15.01.2018

Accepted for publication 21.02.2018

Abstract

The effect of non-flatness of semiconductor wafers on characteristics of manufactured devices is shown through defocusing of an image of a topological layout of a structure being formed and through reduction of resolution at photolithographic processing. For quality control of non-flatness the Makyoh method is widely used. However, it does not allow obtaining quantitative characteristics of observed defects, which essentially restricts its application. The objective of this work has been developing of a calculation method for dimensions of topographic defects of wafers having semiconductor structures formed on them, which has allowed determining acceptability criteria for wafers, depending on defects dimensions and conducting their timely penalization.

A calculation method under development is based on deduction of relationships linking distortion of image elements to curvature of local sections of a semiconductor wafer that has formed structures. These structures have been considered to be image finite elements and within this range the curvature radius has been assumed to be constant. Sequential calculation of deviation of element ends from ideal plane based on determining their curvature radius has allowed obtaining geometry of a target surface in a set range of elements. Conditions of image formation and requirements to structures have been determined.

Analytical expressions relating a deviation value of elements of a light-to-dark image with surface geometry have been obtained. This allows conducting effective quantitative control of observed topographic defects both under production and research conditions. Examples of calculation of topographic defects of semiconductor silicon wafers have been provided. Comparison of the obtained results with the data obtained by conventional methods has shown their complete conformity.

Keywords: semiconductor structures, Makyoh topography, quantitative characterization, image calculation.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-74-84

Адрес для переписки:

Сенько С.Ф.
Физико-технический институт Национальной академии
наук Беларуси,
ул. Купревича, 10, г. Минск 220114, Беларусь
e-mail: senkosf@tut.by

Address for correspondence:

Sianko S.F.
Physical Technical Institute of the National Academy
of Sciences of Belarus
Kuprevich str., 10, Minsk 220141, Belarus
e-mail: senkosf@tut.by

Для цитирования:

Сенько С.Ф., Зеленин В.А.
Оценка размеров топографических дефектов полупроводниковых
кремниевых структур.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 1. С. 74–84.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-74-84

For citation:

Sianko S.F., Zelenin V.A.
[Estimation of topographic defects dimensions of semiconductor
silicon structures].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 1, pp. 74–84 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-74-84

Введение

Геометрическое совершенство полупроводниковых пластин оказывает огромное влияние на выход и качество изготавливаемых на них приборов. Однако, поскольку пластин с идеальными плоскими поверхностями не существует, можно утверждать, что в действительности поверхность любой пластины характеризуется объемным топографическим рельефом. Положение любой точки на ее поверхности однозначно характеризуется тремя координатами X , Y и Z . Наибольший интерес при этом представляет изменение координаты Z на заданном участке поверхности от некоторого значения, соответствующего идеальной плоскости, иначе неплоскостность, выражаемая как функция $Z = f(X, Y)$ и определяемая качеством механической обработки рабочей поверхности.

Влияние неплоскостности на характеристики изготавливаемых приборов проявляется через расфокусировку изображения топологии формируемой структуры и снижение разрешения при проведении фотолитографических операций. Современные проекционные системы, использующие дальнее ультрафиолетовое излучение ($\lambda = 100\text{--}300$ нм), характеризуются глубиной фокуса 1–2 мкм. Размер кристаллов ИС при этом составляет примерно 1×1 см. Это означает, что допустимая неплоскостность составляет 2 мкм на 1 см длины. В противном случае часть элементов кристалла будет находиться вне фокуса и их размеры уже не будут соответствовать требуемым нормам [1].

Нормативно-техническая документация на полупроводниковые пластины в качестве одного из основных требований выдвигает соответствие качества обработки поверхности 14 классу шероховатости [2, 3], что соответствует высоте неровностей профиля R_z менее 25 нм. Однако фактические требования к качеству поверхности гораздо выше, т.к. современные полупроводниковые приборы базируются на технологии, использующей пленки толщиной 10 нм и менее. Кроме того, многочисленные исследования качества поверхности пластин после полировки показали наличие разнообразных дефектов [4–7], связанных как непосредственно с полировкой, так и с предыдущими операциями, в частности выращиванием слитков, их резкой на пластины, травлением и т.д.

Контроль поверхностей такого уровня качества достигается теньевыми методами, которые позволяют выявлять дефекты размером порядка $1/100$ длины волны, что для видимого света составляет величину порядка 7 нм. Среди них широкое распространение получил метод опти-

ческой топографии [8–10], называемый в зарубежной литературе методом *Макуош* топографии [11, 12]. С помощью данного метода проведены обширные исследования топографических дефектов поверхности полупроводниковых пластин и их связи с другими видами дефектов [13–16]. Установлены виды дефектов и причины их возникновения, в частности ямок, бугорков, волнистости поверхности и др. Установлена их взаимосвязь с другими дефектами подложек, например свирл-дефектами, линиями скольжения. Определены размеры топографических дефектов в плане. В то же время практически отсутствует информация об их размерах в высоту, что сдерживает разработку критериев годности пластин по данной группе дефектов. Одной из причин этого является сложная нелинейная зависимость интенсивности изображения дефекта от его геометрических параметров и отсутствие приемлемых методов расчета наблюдаемых изображений.

Цель данной работы заключалась в разработке методики расчета размеров топографических дефектов пластин со сформированными на них полупроводниковыми структурами, что позволило установить критерии годности пластин в зависимости от размеров дефектов и проводить их своевременную отбраковку.

Формирование изображения структур методом оптической топографии

Метод оптической топографии основан на простых законах геометрической оптики. Оптическая схема контроля приведена на рисунке 1.

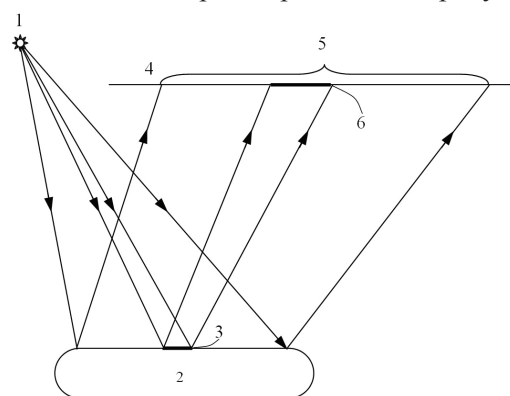


Рисунок 1 – Оптическая схема контроля поверхностей методом оптической топографии: 1 – источник света; 2 – контролируемая поверхность; 3 – дефект; 4 – экран; 5 – светотеневое изображение поверхности; 6 – изображение дефекта

Figure 1 – Scheme of Makyoh topography imaging: 1 – light source; 2 – target surface; 3 – defect; 4 – screen; 5 – light-to-dark image of surface; 6 – defect image

Свет от гомоцентрического источника падает на контролируемую поверхность, отражается от нее и попадает на экран. Наличие неровностей поверхности кремниевых пластин со сформированными на них полупроводниковыми структурами приводит к локальному изменению угла отражения света по отношению к углу отражения поверхностью в целом, что проявляется в искажении изображения структуры в локальных областях с $Z \neq 0$. При $Z < 0$ (вогнутость поверхности) изображение структуры уменьшается, а при $Z > 0$ (выпуклость) – увеличивается. Величина искажений напрямую зависит от размеров дефектов, что позволяет рассчитать размеры микронеровностей поверхности полупроводниковой пластины.

Искажение изображения на криволинейном участке поверхности

Удобными объектами для расчета размеров дефектов являются полупроводниковые пластины со сформированными на них структурами в виде кристаллов прямоугольной формы с размерами сторон 1–3 мм. Сформированные структурами можно рассматривать как координатную сетку с размерами ячейки x вдоль оси X и y вдоль оси Y . Условие ортогональности осей X и Y при этом не является обязательным. Измерение искажения изображения такой сетки позволяет рассчитать величину неровностей.

От размера структурного элемента или ячейки координатной сетки зависит точность расчета координат Z дефекта. Уменьшение размера ячейки приводит к увеличению количества измерений и повышению точности контроля. Расчет размеров неровностей поверхности возможен, если максимальный размер ячейки не превышает трети размера дефекта в плане, т.е. необходимо, чтобы изображение дефекта с линейными размерами l было разделено по крайней мере на три элемента. Если изображение дефекта разделено ровно на два элемента, то границы дефекта и границы этих элементов совпадают и смещения изображения не наблюдается, т.к. для края и центра дефекта данное смещение отсутствует.

С уменьшением размеров ячейки координатной сетки точность контроля возрастает. Однако минимальный размер ячейки имеет свой предел. Физический предел определяется разрешающей возможностью метода по изображению дефек-

тов в плане. Так, для случая, изображенного на рисунке 1, он равен:

$$\delta_{\min} = \frac{gh}{g+h} \times \operatorname{tg} \gamma, \quad (1)$$

где γ – угловой размер используемого источника света; g – расстояние от источника света до контролируемой поверхности, h – расстояние от контролируемой поверхности до экрана. Для наиболее типичного случая, когда $g = 1$ м, $h = 1$ м и $\operatorname{tg} \gamma = 0,0001$ такой предел составляет 50 мкм, т.е. величину порядка ширины скрайберной дорожки на полупроводниковой пластине.

Примем, что каждая ячейка сетки представляет собой элементарный участок поверхности, который может быть вогнутым ($Z < 0$), выпуклым ($Z > 0$) или плоским ($Z = 0$). Допустим также, что радиус кривизны контролируемой поверхности в пределах каждого такого отдельно взятого элемента является величиной постоянной. Изображение контролируемой поверхности на экране также оказывается разделенным на отдельные элементы, ограниченные линиями координатной сетки. Однако вследствие кривизны поверхности пластины размеры таких элементов на экране оказываются искаженными. Определим соотношение между расстояниями от источника света до контролируемой поверхности, от контролируемой поверхности до экрана и радиусами кривизны R элементов контролируемой поверхности.

Воспользуемся формулой сферического зеркала [4]:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{F} = \frac{2}{R}, \quad (2)$$

где F – расстояние от контролируемой поверхности до точки фокусировки отраженного светового потока. Отсюда:

$$F = \frac{Rg}{2g - R}. \quad (3)$$

Для обеспечения однозначности результатов контроля различных неровностей одной и той же поверхности необходимо, чтобы изображение всех элементарных участков, составляющих контролируемую поверхность, формировались одинаковым образом. Размеры изображений ячеек координатной сетки на выпуклых участках поверхности всегда больше по сравнению

с размерами изображений ячеек, расположенных на плоских участках поверхности. Изображения же структур, расположенных на вогнутых участках поверхности, сильно зависят от положения экрана и могут быть прямыми уменьшенными, перевернутыми уменьшенными и перевернутыми увеличенными. Для достоверной идентификации дефектов и проведения расчетов приемлемым является лишь такой случай, когда вогнутые участки дают прямое уменьшенное изображение, т.е. противоположное изображению выпуклых участков. Размеры изображений ячеек координатной сетки на вогнутых участках поверхности при этом меньше по сравнению с размерами изображений ячеек, расположенных на плоских участках поверхности. Это может быть осуществлено только в случае, если фокусы вогнутых элементов будут располагаться после экрана (т.е. $F > h$) или же будут отсутствовать вовсе (случай, если $2g < R$, а также для выпуклых элементов $R < 0$). Данное условие можно выразить математически в виде:

$$R > \frac{2gh}{g+h}. \quad (4)$$

Если данное условие не соблюдается, изображение вогнутого элемента контролируемой поверхности на экране либо превращается в точку ($F = h$) и становится практически невидимым, либо является перевернутым и накладывается на изображение других элементов ($F < h$). Часть изображений ячеек «исчезает», что создает некоторую неопределенность при идентификации изображения. В этих случаях проведение измерений параметров изображения сильно усложняется или даже практически невозможно.

Следующим этапом настоящей методики является измерение смещений Δx и Δy изображений ячеек координатной сетки и расчет координат. Измерение смещений изображений ячеек координатной сетки может быть осуществлено с помощью практически любых измерительных приспособлений либо программными средствами при загрузке изображения в персональный компьютер. В отдельных случаях, когда размеры неровностей соизмеримы с размерами всей контролируемой поверхности, проводят измерение размеров изображения ячейки координатной сетки, из которого вычитают расчетный размер этого изображения, равный $x^* = x(g+h)/g$.

Расчет координат X и Y не представляет затруднений. Смещение изображений ячеек

не приводит к изменению количества элементов изображения. Поэтому координаты выбранной точки можно вычислить простым умножением порядкового номера элемента на его размер в направлении оси X или Y :

$$X_{ij} = ix|_{j=\text{const}}, \quad (5)$$

$$Y_{ij} = jy|_{i=\text{const}}. \quad (6)$$

Сложнее обстоит дело с определением координаты Z_{ij} . Это возможно только на основании измерений смещений изображений координатной сетки. Изменение величины Z_{ij} определяется смещением изображения как контролируемого элемента, так и предыдущего, причем вклад смещения изображения предыдущего элемента в два раза выше. Очевидно, и это будет показано ниже, что приращение величины Z_{ij} определяется тангенсом угла наклона контролируемого элемента к плоскости контролируемой поверхности, определяемого как $\Delta x/2h$. Значение Z_i для ряда, состоящего из нескольких элементов изображения при $j = \text{const}$, является суммой приращений отдельных элементов и может быть выражено как:

$$Z_i = z_0 - \frac{kx}{2h} \sum_{n=1}^{i-1} \Delta x_n - \frac{kx \Delta x_i}{4h}. \quad (7)$$

На рисунке 2 приведена схема образования смещения изображения элементов поверхности, поясняющая соотношение между углами падающих и отраженных лучей, а на рисунке 3 приведена схема, поясняющая формирование профиля поверхности. Наличие неровности на контролируемой поверхности приводит к смещению изображения ее элементов. Свет от точечного источника S , расположенного на расстоянии g от контролируемой поверхности, падает на элемент контролируемой поверхности AB с некоторой кривизной радиусом R с центром в точке O . Точка A данного элемента совпадает с положением x_0 , соответствующим идеальной плоскости, а точка B отклонена от этой идеальной плоскости на величину $\Delta z = x_3 B$. Примем, что размер контролируемого элемента поверхности достаточно мал, и изменением радиуса его кривизны от точки A до точки B можно пренебречь. Размер контролируемого элемента AB в плане вдоль оси X , принадлежащей плоскости контролируемой поверхности, составляет величину $x = x_0 x_3$. Контролируемый элемент дает на экране, располо-

женном от контролируемой поверхности на расстоянии h , изображение вдоль соответствующей оси X^* , принадлежащей плоскости экрана, размером $x^* + \Delta x = x_0^* x_7^*$. На основании геометрической оптики легко определить соотношение между углами α ($\text{tg}\alpha = x/R$) и β ($\text{tg}\beta = x/g$). В случае отсутствия кривизны контролируемой поверхности размер изображения составил бы величину $x^* = x_0^* x_4^* = x(g+h)/g$. Величина смещения изображения края контролируемого элемента, соответствующего точке B , от положения, соответствующего идеальной плоскости (далее – изменение размеров элемента в соответствующем направлении X или Y по отношению к размеру, соответствующему идеальной плоскости), составляет величину $\Delta x = x_4^* x_7^*$, которую можно выразить как:

$$\Delta x = h \times \text{tg}(2\alpha - \beta + \beta) = h \times \text{tg}2\alpha. \quad (8)$$

Отсюда:

$$\text{tg}2\alpha = \frac{\Delta x}{h} \quad (9)$$

или для малых углов

$$\text{tg}\alpha = \frac{\Delta x}{2h}. \quad (10)$$

Поскольку $x_0 x_1 = x_1 x_3$, то величину отклонения $\Delta z = x_3 B$ поверхности от идеальной плоскости можно записать как:

$$\Delta z = -\frac{x}{2} \times \text{tg}\alpha = -\frac{x\Delta x}{4h}. \quad (11)$$

Знак минус указывает на то, что положительные значения смещения Δx соответствуют отрицательным значениям Δz (т.е. дефект имеет форму ямки).

Из рисунка 2 видно, что величина R связана с Δx следующим соотношением:

$$R = \frac{x}{\text{tg}\alpha} = \frac{2hx}{\Delta x}. \quad (12)$$

Это отношение можно использовать в случае необходимости для предварительной оценки радиуса кривизны дефектов контролируемой поверхности с точки зрения обеспечения необходимого условия формирования ее изображения.

$$z_2 = z_{2-1} + z_{2-2} + z_{2-3} = z_1 - x \text{tg}\alpha_1 - \frac{x}{2} \times \text{tg}(\alpha_2 - \alpha_1) = z_0 - \frac{x\Delta x_1}{2h} - \frac{x\Delta x_2}{4h}. \quad (14)$$

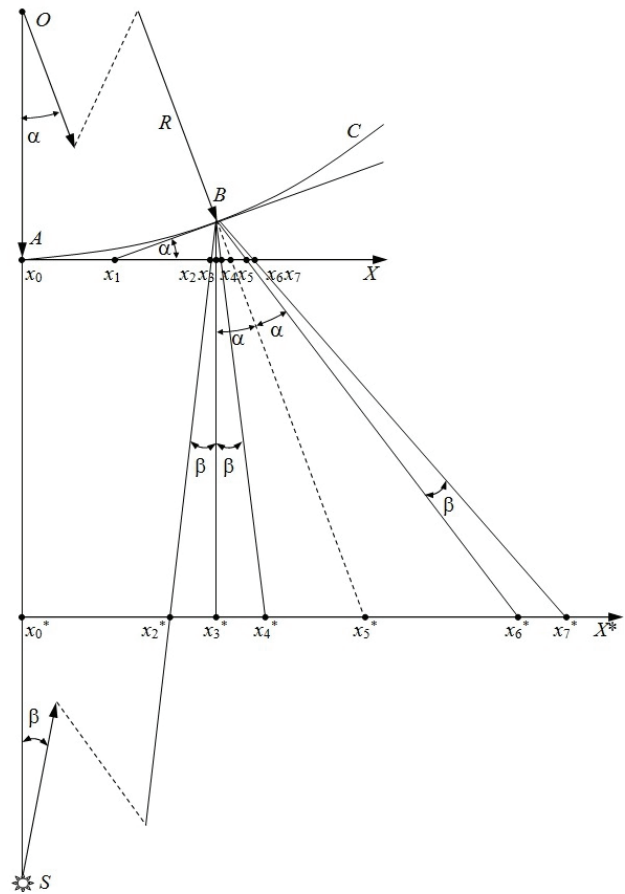


Рисунок 2 – Отражение света на криволинейном участке поверхности

Figure 2 – Light reflection at a curvilinear section of surface area

Теперь рассмотрим смещение изображения и восстановление профиля поверхности при наличии множества элементов изображения. В данном случае необходимо учесть изменение радиуса кривизны контролируемой поверхности при переходе от одного элемента к другому. Из рисунка 3 можно определить поэлементное изменение величины z_i . За точку отсчета примем некоторый элемент изображения, расположенный на бездефектном участке поверхности, т.е. соответствующий условию $z_0 = 0$ и $x_0 = 0$. Величина отклонения z_1 поверхности от идеальной плоскости для первого элемента в точке x_1 составляет:

$$z_1 = z_0 - \frac{x}{2} \times \text{tg}\alpha_1 = z_0 - \frac{x\Delta x_1}{4h}. \quad (13)$$

Для второго элемента отклонение состоит из трех составляющих:

Аналогично для последующих элементов:

$$z_3 = z_{3-1} + z_{3-2} + z_{3-3} = z_2 - x \operatorname{tg} \alpha_2 - \frac{x}{2} \times \operatorname{tg}(\alpha_3 - \alpha_2) = z_0 - \frac{x \Delta x_1}{2h} - \frac{x \Delta x_2}{2h} - \frac{x \Delta x_3}{4h} \quad (15)$$

$$z_4 = z_{4-1} + z_{4-2} + z_{4-3} = z_0 - \frac{x \Delta x_1}{2h} - \frac{x \Delta x_2}{2h} - \frac{x \Delta x_3}{2h} - \frac{x \Delta x_4}{4h}. \quad (16)$$

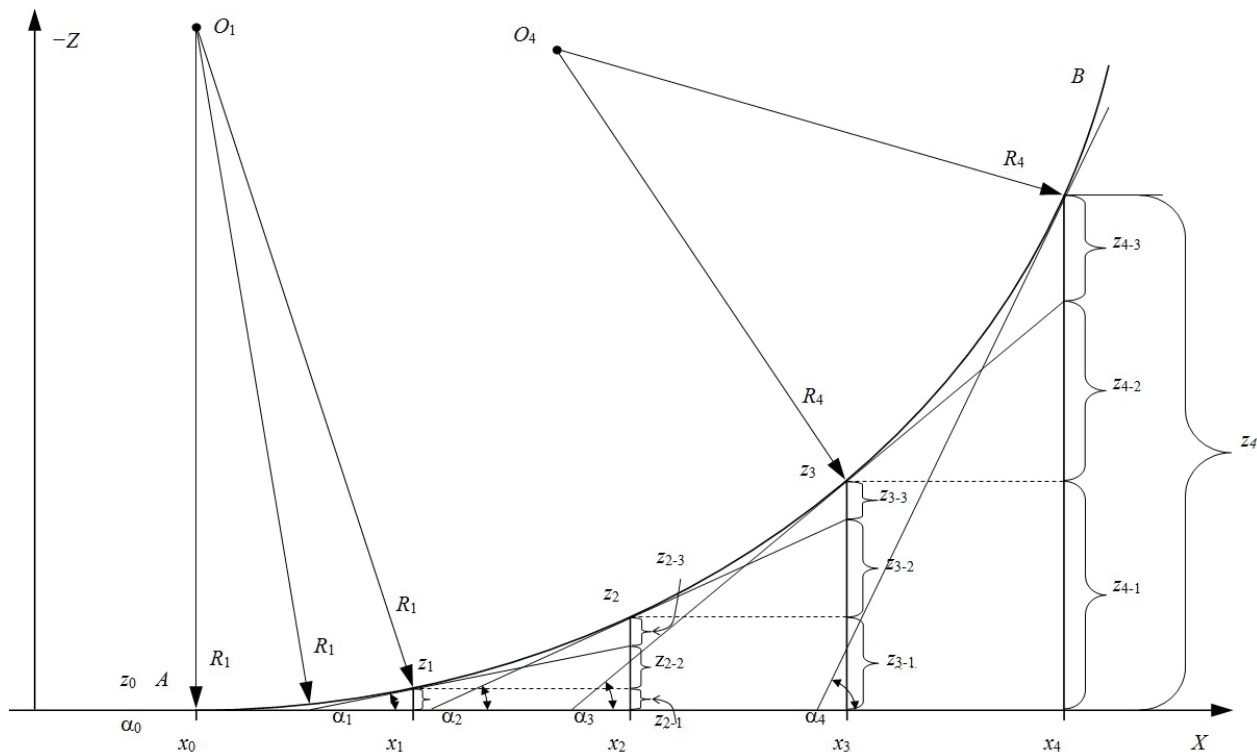


Рисунок 3 – Элементы изображения и соответствующие им элементы поверхности

Figure 3 – Image elements and corresponding surface elements

Общая формула для координаты Z_i вдоль оси X (т.е. профиль контролируемой поверхности вдоль оси X) принимает следующий вид:

$$Z_i = z_0 - \frac{x}{2h} \sum_{n=1}^{i-1} \Delta x_n - \frac{x \Delta x_i}{4h} \Big|_{i=\text{const}} \quad (17)$$

Аналогичное выражение для профиля вдоль оси Y .

$$Z_j = z_0 - \frac{y}{2h} \sum_{n=1}^{j-1} \Delta y_n - \frac{y \Delta y_j}{4h} \Big|_{j=\text{const}} \quad (18)$$

Полученные формулы, несмотря на кажущуюся сложность, достаточно просты в применении. При расчете профиля к ранее полученному значению z_{i-1} прибавляется величина Δz_i :

$$\Delta z_i = -\frac{x}{4h} (\Delta x_{i-1} + \Delta x_i). \quad (19)$$

Очевидно, что расчетные значения для одного и того же элемента, полученные по формулам для Z_i и Z_j , должны быть практически одинаковыми с учетом погрешности измерений, если координаты z_{ij} исходных точек одинаковы, т.е. $z_{0i} = z_{0j}$.

Рассмотрим несколько примеров расчета реальных структур.

На рисунке 4 приведена топограмма кремниевой пластины со сформированными структурами интегральных схем, которая свидетельствует о наличии в центре пластины топографического дефекта. Увеличенное изображение дефектной области приведено на рисунке 5. Коэффициент линейного увеличения приведенного изображения к действительному изображению топограммы составил 2,5. Значения g и h при получении топограммы составили соответственно 1,0 м и 0,5 м. Диаметр пластины составляет 100 мм, размер кристалла $4,00 \times 4,65$ мм, т.е. $x = 4,00$ мм, $y = 4,65$ мм.

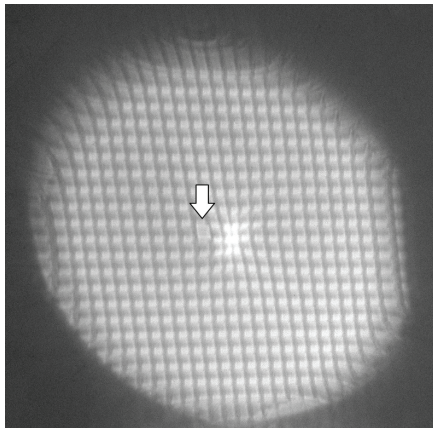


Рисунок 4 – Топограмма полупроводниковой кремниевой пластины со сформированными структурами

Figure 4 – Makyoh image of a semiconductor silicon wafer with formed structures

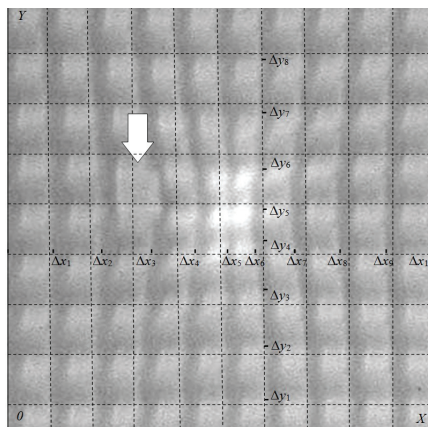


Рисунок 5 – Определение величины смещения изображения элементов на топограмме

Figure 5 – Determination of a deviation value of elements on a Makyoh image

В таблице 1 приведены результаты контроля профиля дефекта вдоль направления X . Величина увеличенного смещения изображения чипов на приведенной топограмме обозначена как Δx_i^* .

Величина смещения изображения чипов на действительной топограмме обозначена как Δx_i ($\Delta x_i = \Delta x_i^*/2,5$). Значение Z_i^* получали путем прямого измерения профиля с помощью индикатора многооборотного с ценой деления 1 мкм. Аналогичные результаты контроля вдоль оси Y приведены в таблице 2.

Во избежание ошибки при определении точки отсчета в качестве ориентира использовали тестовый модуль, имеющий иные размеры и помеченный стрелками. Из приведенных данных видно, что результаты контроля с учетом относительно невысокой точности измерений, проведенных с помощью многооборотного индикатора, хорошо согласуются друг с другом.

На рисунке 6 приведены фотография (а) и топограмма (b) кремниевой пластины со следами резки и сформированными на ней тестовыми МОП конденсаторами.

На рисунке 7 приведен геометрический профиль этой пластины вдоль направления АА (подачи режущего круга), полученный путем прямого измерения индикатором многооборотным (а), а также расчетным путем (b) на основании измерения смещения элементов изображения с использованием выражений (17) и (19).

Таблица 1

Результаты контроля профиля дефекта вдоль направления X

Defect profile control results along X

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$X_{i,j=3}, \text{ mm}$	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
$\Delta x_i^*, \text{ mm}$	0	1,0	3,0	5,5	5,0	1,5	-3,0	-5,0	-4,5	-3,0	-0,5
$\Delta x_p, \text{ mm}$	0	0,4	1,2	2,2	2,0	0,6	-1,2	-2,0	-1,8	-1,2	-0,2
$Z_{i,j=3}, \mu\text{m}$	0	-0,8	-4,0	-10,8	-19,2	-24,4	-23,2	-16,8	-9,2	-3,2	-0,4
$Z_{i,j=3}^*, \mu\text{m}$	0	0	-5	-10	-18	-22	-22	-15	-10	-4	0

Таблица 2

Результаты контроля профиля дефекта вдоль направления Y

Defect profile control results along Y

j	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$Y_{i=4,j}, \text{ mm}$	0	4,65	9,30	13,95	18,60	23,25	27,90	32,55	37,20
$\Delta y_j^*, \text{ mm}$	0	1,5	3,5	5,5	4,0	-2	-6	-4	-2,5
$\Delta y_p, \text{ mm}$	0	0,6	1,4	2,2	1,6	-0,8	-2,4	-1,6	-1,0
$Z_{i=4,j}, \mu\text{m}$	0	-1,4	-6,0	-14,4	-23,3	-25,1	-17,7	-8,4	-2,3
$Z_{i=4,j}^*, \mu\text{m}$	0	-1	-5	-12	-22	-22	-16	-8	-2

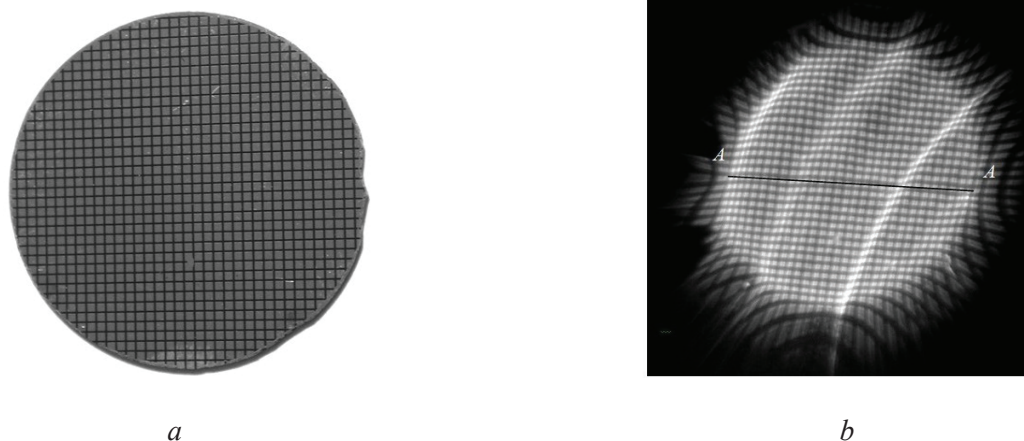


Рисунок 6 – Внешний вид полупроводниковой структуры со следами резки (a) и ее оптическая топограмма (b)
Figure 6 – Semiconducting structure with grinding marks (a) and its Makyoh image (b)

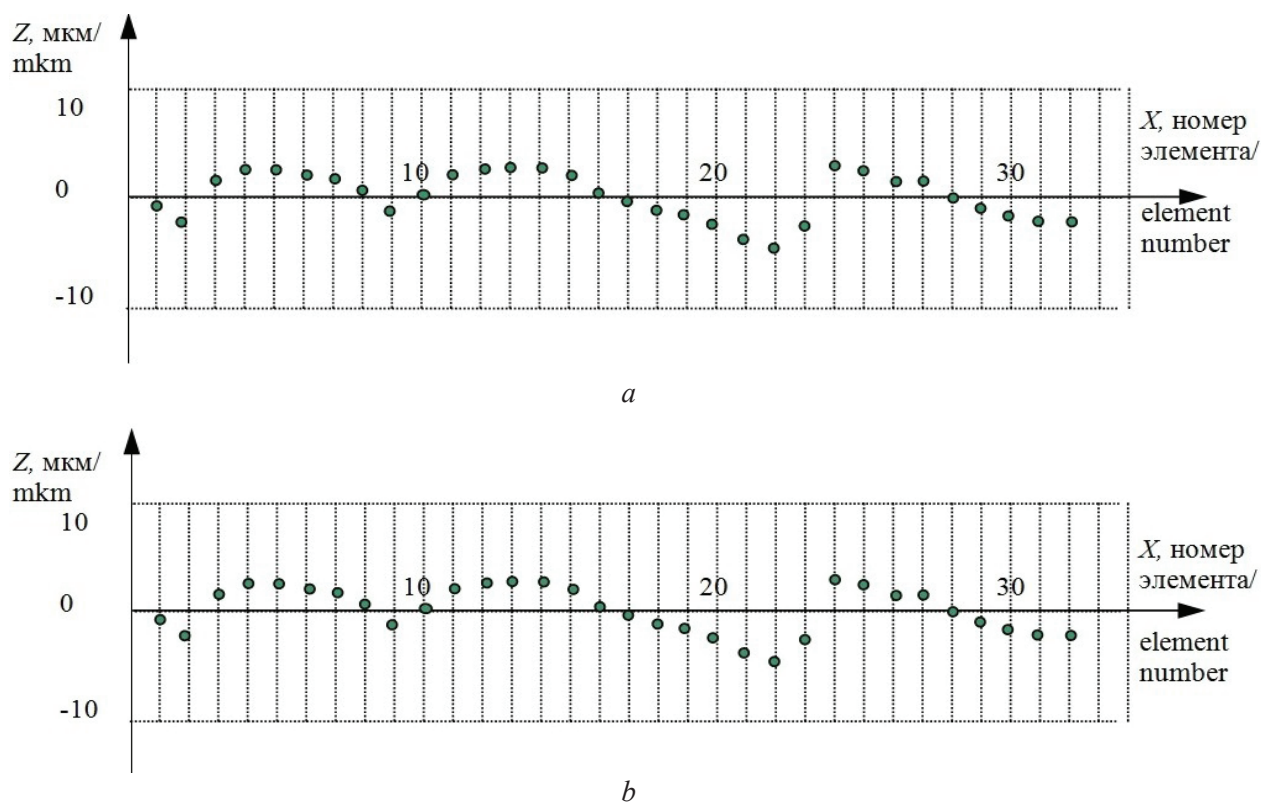


Рисунок 7 – Измеренный (a) и расчетный (b) профили поверхности пластины со следами резки
Figure 7 – Measured (a) and analytical (b) profiles of a wafer surface with grinding marks

В первом случае изменение профиля обусловлено как неровностью поверхности, так и изменением толщины пластины, и характеризуется максимумом для 24-го элемента (314 мкм) и минимумом для 2-го элемента (302 мкм). Во втором – только неровностью поверхности, т.е. следами резки. Максимальное различие в высоте профиля (8 мкм) получено между 22-м и 24-м элементами. С учетом этого различия полученные профили можно считать совпадаю-

щими. Характерной чертой полученных профилей является заметный пилообразный характер, что связано с особенностями динамики процесса резки.

Закключение

Предложена методика расчета микрогеометрических параметров поверхностей на основе измерений искажения изображения сформиро-

ванных на них структур. Получены выражения, связывающие величину искажения изображения на топограммах и геометрический профиль поверхности, что позволяет осуществлять количественный контроль наблюдаемых дефектов. Приведены примеры расчета реальных топографических дефектов.

Полученные результаты могут быть использованы как в исследовательских целях, так и в условиях серийного производства для оперативного контроля и разбраковки полупроводниковых структур.

Список использованных источников

1. Моро, У. Микролитография. Принципы, методы, материалы / У. Моро ; пер. с англ. : в 2 ч. Ч. 2. – М. : Мир, 1990. – 608 с.
2. Pei, Z.J. A study of surface grinding of 300 mm silicon wafers / Z.J. Pei // *International Journal of Mashine Tools & Manufacture*. – 2002. – Vol. 42 (3) – P. 385–393.
3. Pei, Z.J. Fine grinding of silicon wafers / Z.J. Pei, A. Strasbaugh // *International Journal of Mashine Tools & Manufacture*. – 2001. – Vol. 41 (5). – P. 659–672.
4. Пасынков, В.В. Материалы электронной техники / В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. – СПб. : Лань, 2003. – 368 с.
5. Нанотехнологии в электронике / под ред. Ю.А. Чаплыгина. – М. : Техносфера, 2005. – 450 с.
6. Sievert, W. New standards improve chemistry between device makers, suppliers / W. Sievert // *Semiconductor magazine*. – 2000. – Vol. 1. – Iss. 3. – P. 30–34.
7. Бохан, Ю.И. Доминирующие факторы лазерного геттерирования кремниевых пластин / Ю.И. Бохан, В.С. Каменков, Н.К. Толочко // *Физика и техника полупроводников*. – 2015. – Т. 49, вып. 2. – С. 278–282.
8. Сенько, С.Ф. Особенности формирования изображений дефектов при контроле поверхностей методом оптической топографии / С.Ф. Сенько // *Микроэлектроника*. – 2003. – Т. 32, № 6. – С. 375–385.
9. Сенько, С.Ф. Цветовая диагностика топографических дефектов / С.Ф. Сенько, А.С. Сенько // *Доклады БГУИР*. – Апрель–июнь 2003. – Т. 1, № 2. – С. 103–106.
10. Зеленин, В.А. Новые методы и приборы контроля в технологии микроэлектроники / В.А. Зеленин, С.Ф. Сенько // *Технологии Физтеха. Юбилейный сборник трудов : в 2 т. Т. 1* / под общ. ред. академик НАН Беларуси С.А. Астапчик. – Минск : ЭКОПЕРСПЕКТИВА, 2003. – С. 234–253.
11. Riesz, F. Geometrical optical model of the image formation in Makyoh (magic-mirror) topography / Ferenc Riesz // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2000. – Vol. 33. – P. 3033–3040.
12. Riesz, F. Makyoh Topography for the Study of Large-Area Extended Defects in Semiconductors. / Ferenc Riesz // *Phys. Stat. Sol. (a)*. – 1999. – Vol. 171, no. 1. – P. 403–409.

13. Riesz, F. Makyoh-topography study of the swirl defects in Si wafers / R. Ferenc, A.E. Pap, M. Ádám, I.E. Lukács // *Thin Solid Films*. – 2008. – Vol. 516, iss. 22. – P. 8087–8091.

14. Mock, P. How to avoid plastic deformation in GaAs wafers duaring molecular beam epitaxial growth / P. Mock, G.W. Smith // *Cryst. Res. Technol.* – 2000. – Vol. 35. – P. 541–548.

15. Berry, M.V. Oriental magic mirrors and the Laplacian image / M.V. Berry // *European Journal of Physics*. – 2006. – Vol. 27. – P.109–118.

16. Chidambaram, S. Fine grinding of silicon wafers: a mathematical model for the chuck shape / S. Chidambaram, Z.J. Pei, S. Kassir // *International Journal of Mashine Tools & Manufacture*. – 2003. – Vol. 43 (7). – P. 739–746.

References

1. Wayne M. Moreau. *Semiconductor Lithography. Principles, Practices, and Materials*. Plenum Press. New York and London, 1988, 608 p.
2. Pei Z.J. A study of surface grinding of 300 mm silicon wafers. *International Journal of Mashine Tools & Manufacture*, 2002, vol. 42 (3), pp. 385–393.
3. Pei Z.J., Strasbaugh A. Fine grinding of silicon wafers. *International Journal of Mashine Tools & Manufacture*, 2001, vol. 41 (5), pp. 659–672.
4. Pasynkov V.V., Sorokin V.S. *Materialy elektronnoi tekhniki* [Electronic technology materials]. St. Petersburg, Lan Publ., 2003, 368 p.
5. *Nanotekhnologii v elektronike* [Nanotechnology in electronics]. Under red. Yu.A. Chaplygina. Moscow, Tehnosfera Publ., 2005, 450 p.
6. Sievert W. New standards improve chemistry between device makers, suppliers. *Semiconductor magazine*, 2000, vol. 1, iss. 3, pp. 30–34.
7. Bohan Yu.I., Kamenkov V.S., Tolochko N.K. [Dominant factors of laser gettering of silicon plates]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and technology of semiconductors], 2015, vol. 49, no. 2, pp. 278–282 (in Russian).
8. Senko S.F. [Peculiarities of forming of defects images under surface control by optical topography]. *Mikroelektronika* [Microelektronics], 2003, vol. 32, no. 6, pp. 375–385 (in Russian).
9. Senko S.F., Senko A.S. [Color diagnostics of topographic defects]. *Doklady BGUIR*. [Proceeding of the BSUIR], 2003, vol. 1, no. 2, pp. 103–106 (in Russian).
10. Zelenin V.A., Senko S.F. [New methods and control devices in microelectronics]. *Tehnologii Fiztekha. Yubileinyi sbornik trudov* [FTI Technology. Jubilee collection works]. In 2 parts. Part.1. Under red. academician S.A. Astapchik. Minsk, EKOPERSPEKTIVA Publ., 2003, pp. 234–253.
11. Riesz F. Geometrical optical model of the image formation in Makyoh (magic-mirror) topography. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2000, vol. 33, pp. 3033–3040.

12. Riesz F. Makyoh Topography for the Study of Large-Area Extended Defects in Semiconductors. *Phys. Stat. Sol. (a)*, 1999, vol. 171, no. 1, pp. 403–409.

13. Riesz F., Pap. E.A., Ádám M., Lukács I.E. Makyoh-topography study of the swirl defects in Si wafers. *Thin Solid Films*, 2008, vol. 516, iss. 22, pp. 8087–8091.

14. Mock P., Smith G.W. How to avoid plastic deformation in GaAs wafers during molecular beam

epitaxial growth. *Cryst. Res. Technol.*, 2000, vol. 35, pp. 541–548.

15. Berry M.V. Oriental magic mirrors and the Laplacian image. *European Journal of Physics*, 2006, vol. 27, pp. 109–118.

16. Chidambaram S., Pei Z.J., Kassir S. Fine grinding of silicon wafers: a mathematical model for the chuck shape. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003, vol. 43 (7), pp. 739–746.