

На правах рукописи

Захарченко Алексей Александрович

**МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ
РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКОГО
МИКРОСКОПА**

Специальность 05.13.18

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Москва, 2006 г.

Работа выполнена на кафедре компьютерных методов физики физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Алексей Иванович Чуличков

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Александр Николаевич Боголюбов
кандидат физико-математических наук,
Николаев Дмитрий Петрович

Ведущая организация: Московский авиационный институт

Защита диссертации состоится «___» _____ 2006 г. в _____ на заседании Диссертационного Совета К 501.001.17 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, Ленинские горы, МГУ, физический факультет, ауд. № _____

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Автореферат разослан «___» _____ 2006 г.

Ученый секретарь

Диссертационного Совета 501.001.17,

Доктор физико-математических наук

П.А. Поляков

Общая характеристика работы

Актуальность

В настоящее время задача измерения и визуализации рельефа поверхности микрообъектов является чрезвычайно актуальной в различных областях науки и промышленности. Существуют несколько основных методик измерения и визуализации рельефа поверхности: поверхностная профилометрия, зондовая сканирующая микроскопия, растровая электронная и просвечивающая электронная микроскопия, и, наконец, оптическая конфокальная микроскопия. Развиваются также методы реконструкции рельефа поверхности с помощью «классического» оптического микроскопа. Это методы стереомикроскопии и методы определения высоты поверхности по фокусу. Методы, использующие «классический» микроскоп, существенно дешевле аналогов. А по характеристикам они могут конкурировать с современной конфокальной микроскопией в области размеров выше 100 нм.

Методы стереомикроскопии в целом гораздо менее точные, нежели методы измерения высоты по фокусу и используются для визуального наблюдения объемного объекта. Методы же измерения высоты по фокусу, требующие больших расчетов, получили свое развитие лишь в конце 90-х годов прошлого века и в настоящее время быстро развиваются с развитием вычислительной техники¹. Они основаны на том, что область объекта изображается наиболее четко, когда она находится в фокусе. По нескольким изображениям, захваченным при различном положении фокуса микроскопа, для каждой области объекта строится кривая измерения фокуса, выражающая степень «сфокусированности» этой области объекта. Максимум кривой измерения фокуса соответствует

¹ M. Noguchi and S. Nayar. Microscopic shape from Focus using Active Illumination 12th IAPR Int. Conf. on Patt. Recog. Vol. 1, IEEE, pp 147-152, 1994.

положению, при котором область находится в фокусе. Поэтому, найдя для каждой области положение максимума функции измерения фокуса, можно реконструировать и измерить рельеф поверхности объекта. Однако, на практике, кривая измерения фокуса зашумлена и искажена, поэтому максимум кривой может не соответствовать положению фокуса. Кроме того, существуют области на изображении, высоту которых определить нельзя из-за отсутствия текстуры.

Основным недостатком известных методов определения высоты по фокусу является отсутствие математических методов анализа кривой измерения фокуса, позволяющих оценивать, с какой погрешностью оценена высота рельефа и указывать, насколько правдоподобна математическая модель, используемая для оценки. Существующие методы в качестве оценки высоты рельефа поверхности указывают либо положение максимума кривой, либо некое средневзвешенное значение, при этом погрешность реконструкции оценивается экспериментально на тестовых образцах.

Данная работа посвящена разработке методов анализа кривой измерений фокуса с помощью морфологических методов анализа изображений. В работе построены новые математические методы, минимизирующие погрешность оценивания высоты рельефа в каждой точке анализируемой поверхности и позволяющие определять адекватность используемой математической модели измерения. На базе разработанных методов строится новый метод реконструкции трехмерного рельефа поверхности, позволяющий достигнуть погрешности реконструкции менее 100 нм для задач анализа поверхностей микросхем [2].

Цель работы

Целями настоящей работы являются:

1. Разработка математических методов максимально точного определения микрорельефа поверхности по измерениям яркости его изображений,

полученным с помощью оптического микроскопа с различным положением фокуса.

2. Разработка метода анализа адекватности используемой модели.
3. Создание алгоритмов и программного обеспечения для решения реконструкции трехмерного рельефа поверхности микросхем.

Решаемые задачи

Для достижения указанной цели решаются следующие задачи:

1. Описание класса функций измерения фокуса
2. Разработка морфологических методов анализа кривых измерений фокуса с целью:
 - определения высоты рельефа поверхности;
 - оценки погрешности определения высоты рельефа поверхности;
 - оценки адекватности модели измерения.
3. Создание быстрых вычислительных алгоритмов и оценка их точности.
4. Реализация разработанных методов в виде комплекса программ.
5. Применение разработанных методов к прикладным задачам

Решение этих задач позволяет рассматривать созданные методы измерения микрорельефа поверхности как информационную технологию получения знаний о реальном микрообъекте.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

1. Морфологические методы анализа изображений применялись для анализа кривой измерений фокуса и измерения высоты рельефа поверхности с помощью оптического микроскопа.

2. Получено точное решение задачи наилучшего приближения сигнала элементами множества унимодальных сигналов в конечномерном евклидовом пространстве (вычисления проекции).
3. Разработаны новые методы оценивания положения максимума на зашумленной унимодальной кривой, определены погрешность и адекватность оценки.

Практическое значение

Разработанные методы позволяют существенно улучшить современные методы реконструкции трехмерного рельефа поверхности с помощью оптического микроскопа. Они позволяют создать измерительный прибор, который не просто реконструирует рельеф поверхности, а измеряет высоту поверхности в каждой точке и указывает погрешность измерений. Более того, методы позволяют определить степень доверия к результату оценивания высоты рельефа в заданной точке, базирующуюся на понятии адекватности используемой модели измерения, и исключить из реконструкции сомнительные точки.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Новый метод измерения высоты рельефа поверхности с помощью оптического микроскопа, контролирующий погрешность измерения и адекватность модели измерению в каждой точке поля зрения.
2. Класс функций измерения фокуса, найденный с помощью четко построенной математической модели формирования изображения в оптическом микроскопе.
3. Оператор проецирования на множество унимодальных сигналов и приближенные методы его расчета.

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались на:

- 12 Всероссийской конференции «Математические методы распознавания образов» (Московская обл., г. Звенигород, 2006)
- 13 Международная конференция «Математика. Компьютер. Образование» (г. Дубна, 2006)

Публикации

Основные результаты опубликованы в 5 работах и 1 тезисе конференции.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 112 страниц основного текста, включая 34 иллюстрации и 3 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 96 библиографических ссылок.

Содержание работы

В **первой главе** приводится обзор современных методов измерения и визуализации трехмерного рельефа поверхности. Рассматриваются поверхностная профилометрия, сканирующая зондовая, оптическая и электронная микроскопия. Описаны преимущества и недостатки современных методов. Отдельно выделены методы измерения «высоты по фокусу» как относительно недорогие и вместе с тем достаточно точные методы, получившие развитие с развитием вычислительной техники. Описаны недостатки современных методов – отсутствие математического аппарата анализа функции измерения фокуса.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей рельефа поверхности и формирования изображения в оптическом микроскопе. В **первом параграфе** рассматривается математическая модель рельефа поверхности. Накладываются некоторые условия на наблюдаемый рельеф, а именно отсутствие взаимных перекрытий и полупрозрачности. Во **втором параграфе** рассматривается оптический микроскоп как система формирования изображения рельефа поверхности. Сначала система рассматривается с точки зрения геометрической оптики. Вводятся понятия плоскости объекта (ПО) и плоскости изображения (ПИ). Затем система рассматривается с точки зрения волновой оптики. Вводятся понятия оптической передаточной функции (ОПФ) микроскопа, как дифракционно ограниченной центрально симметричной оптической системы. Показано представление ОПФ в виде произведения двух составляющих: определяемой дифракцией света на объективе и других частях микроскопа и определяемой расфокусировкой объекта. В **третьем параграфе** разрабатывается математическая модель формирования изображения объемного

рельефа поверхности в микроскопе. Записан основной закон формирования изображения рельефа поверхности

$$I(x_0, y_0, z_0) = \int_X dx dy a(x - x_0, y - y_0, z(x, y) - z_0) I_0(x, y), \quad \text{где } I_0(x_0, y_0, z_0) -$$

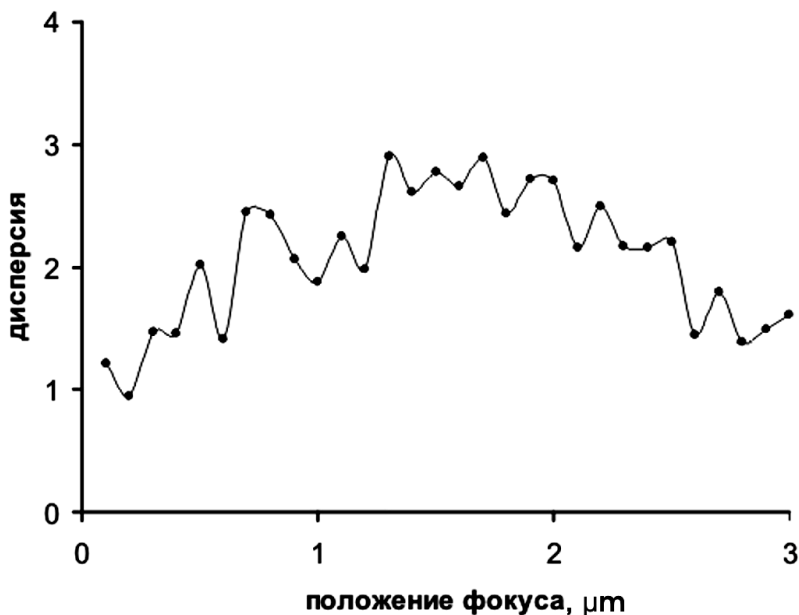
интенсивность света в плоскости изображения при положении столика микроскопа равном z_0 , точка (x_0, y_0) - элемент поля зрения X ; $I_0(x, y)$ - интенсивность отраженного от наблюдаемого объекта света и $a(.,.,.)$ - аппаратная функция микроскопа – Фурье-образ ОПФ.

Введено понятие мультифокусного изображения, как набора изображений $\{I(x_0, y_0, z_i)\}$, $i = 1..n$, полученных при различных положениях столика $z_i \in (z_{\min}, z_{\max})$. Показано, что такая характеристика, как дисперсия яркости области изображения максимальна, если соответствующая ей область поверхности объекта находится в фокусе и монотонно убывает при удалении области поверхности от положения фокуса при условии, что вся область поверхности находится в плоскости, перпендикулярной главной оптической оси микроскопа, и интенсивность отраженного света $I_0(x, y)$ в области поверхности отлична от константы. Поэтому, определив для каждой точки (x_0, y_0) мультифокусного изображения то значение z_k , при котором дисперсия яркости по окрестности точки (x_0, y_0) максимальна, можно построить зависимость $z = z(x_0, y_0)$.

Дисперсия яркости области является не единственной характеристикой. В работе рассмотрены также другие подобные характеристики, общей чертой которых является наличие одного максимума, который соответствует положению «в фокусе». Все эти характеристики названы функциями измерения фокуса.

В четвертом параграфе поставлена задача реконструкции рельефа поверхности по его мультифокусному изображению, решение которой позволит построить прибор, измеряющий рельеф поверхности объектов. Описаны сложности, возникающие при ее решении. А именно, при наличии шума на изображении, функция измерения фокуса также содержит шум, и положение ее максимума может не соответствовать положению фокуса (рис 1). Для построения же измерительного прибора необходимо знать погрешность, с которой измерена высота рельефа. Более того, в ситуациях, когда точка (x_0, y_0) попадает на сильно наклонный участок или на участок, в котором $I_0(x, y) = const$ (отсутствие текстуры на объекте), функция измерения фокуса уже не является функцией с максимумом, соответствующим положению фокуса на поверхности объекта. Ее вид может быть совершенно произвольный. Такие точки необходимо распознавать и исключать из рассмотрения.

В третьей главе описывается морфологический подход к решению задачи



реконструкции². В первом параграфе описываются морфологические методы распознавания образов. Морфологические методы анализа изображений – это математические методы, направленные на решение задач узнавания, классификации объектов,

Рис. 1 Пример реальной функции измерения фокуса. оценки их параметров по изображению, выделение

² Пытьев Ю.П. Задачи морфологического анализа изображений. В сб. "Математические методы исследования природных ресурсов Земли из Космоса". М.:Наука. 1984.

отличий в сцене не связанных с изменением условий регистрации изображений. В отличие от большинства существующих методов распознавания образов, направленных извлечение специальных признаков из изображения объектов, морфологические методы в значительной степени используют математическую модель, связывающую анализируемое изображение с реальной сценой. Вводится основное понятие морфологических методов – форма изображения, которая определяется как множество всех изображений, которые можно получить от данной сцены при всевозможных условиях наблюдения. В данном случае изображением является кривая измерения фокуса, т.е. значения функции измерения фокуса в точках измерения z_i , а его формой – множество V_λ унимодальных кривых с максимумом в точке $\lambda = z_k$, соответствующей положение «в фокусе». С точки зрения морфологических методов, задача определения положения максимума кривой измерений фокуса – это задача оценки параметра формы.

Во **втором параграфе** более подробно рассмотрена форма изображения кривой измерений фокуса. Математически формализовано понятие кривой измерений фокуса как вектора в n -мерном евклидовом пространстве R_n , называемого сигналом, координатами которого являются измерения в точках z_i , $i = 1..n$. Показано, что форма кривой измерений фокуса – это выпуклый замкнутый конус в R_n . В **третьем параграфе** рассматривается основная характеристика формы, используемая при решение задач морфологии – проектор на форму. Показано, что проектор P_{V_λ} на форму V_λ нелинейный. Задача нахождения проекции на форму является задачей выпуклого математического программирования и для ее решения можно воспользоваться методом поиска седловой точки функции Лагранжа. Однако решение такой задачи осложняется тем, что количество измерений n может быть достаточно велико (10^2 - 10^3), что приводит к большому количеству проверяемых условий. В работе предлагается альтернативный метод построения проекции на конус, который существенно быстрее известных методов выпуклого математического программирования. На

рисунке 2 показан пример проекции сигнала на множество унимодальных сигналов.

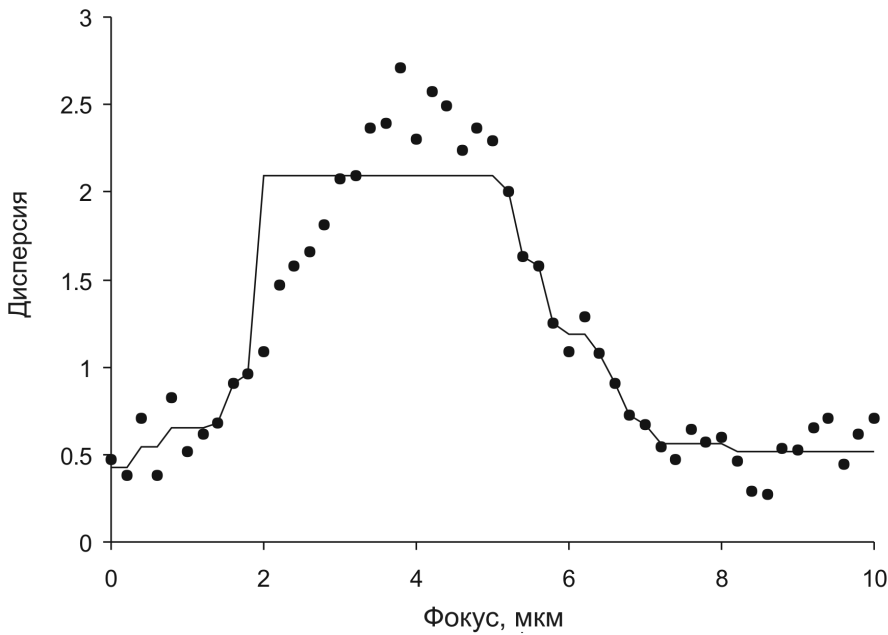


Рис. 2. Проекция сигнала (линия), обозначенного точками, на множество унимодальных сигналов с максимумом в $\lambda = 2$.

Четвертая глава посвящена вопросам погрешности оценки и адекватности модели измерению. В **первом параграфе** рассматривается модель регистрации сигнала, в которой зашумленный сигнал ξ представлен в виде суммы «чистого сигнала» f и аддитивного шума v :

$$\xi = f + v, \quad f \in V_\lambda, \quad v \in R_n. \quad (1.)$$

В выбранной схеме измерений отличие ξ от проекции на $P_{V_\lambda} \xi$ целиком определяется шумом v . На практике шум не может принимать совершенно произвольные значения: вероятность принять некоторые значения мала. Поэтому по величине разности $\xi - P_{V_\lambda} \xi$ можно судить об адекватности модели измерению. Если отличие $\xi - P_{V_\lambda} \xi$ не может быть объяснено шумом, то модель не адекватна. На практике это означает, что в окрестности точки (x_0, y_0) не выполняются условия, наложенные на область вычисления функции измерения фокуса: например, отсутствует текстура на изображении или точка находится на сильно наклонном участке рельефа. В этом случае точку следует исключить из рассмотрения.

Зная априорную информацию о шуме можно найти интервальную оценку положения максимума сигнала λ , т.е. определить погрешность оценки. Во втором и третьем параграфах рассматриваются методы определения интервальной оценки λ с оценкой адекватности модели при различной априорной информации о шуме: детерминированной и стохастической.

Во **втором параграфе** рассматривается решение задачи оценки параметра λ при условии $v \in N \subset R_n$, где N - некое подмножество R_n . Такая модель регистрации сигнала записывается как $[V_\lambda, \Lambda, N]$. В этом случае, оценка $\tilde{\lambda}$ параметра λ может быть получена из условия минимума погрешности оценки как решение задачи на минимакс:

$$|\lambda_0 - \tilde{\lambda}| = \inf_{\lambda \in \Lambda} \sup_{\lambda' \in \Lambda_\xi} |\lambda - \lambda'|, \quad (2.)$$

где $\Lambda_\xi = \{\lambda \in \Lambda : \xi = f + v, f \in V_\lambda, v \in N\}$ - множество значений параметра λ , при которых равенство (1.) выполнено при некоторых $v \in N$ и $f \in V_\lambda$. Это множество содержит те и только те значения параметра, для которых отличие результата измерения ξ от множества V_λ может быть объяснено погрешностью $v \in N$. Оценка λ_0 минимизирует максимально возможную погрешность оценивания параметра λ . Решением задачи (2) является центр шара минимального радиуса, содержащий множество Λ_ξ , радиус этого шара является

погрешностью оценки λ_0 . Адекватность модели равна: $\alpha(\xi) = \begin{cases} 1, & \Lambda_\xi \neq \emptyset \\ 0, & \Lambda_\xi = \emptyset \end{cases}$.

Функция $\alpha(\cdot)$, следуя теории измерительно-вычислительных систем, названа надежностью модели.

В конце параграфа рассмотрен наиболее распространенный частный случай модели $N = \{x \in R_n : \|x\| \leq \delta\}$. Множество Λ_ξ в этом случае содержит те и только те значения параметра $\lambda \in \Lambda_n$, для которых $\|\xi - P_{V_\lambda} \xi\| \leq \delta$. Модель же является адекватной, если $\inf_{\lambda \in \Lambda} \|\xi - P_{V_\lambda} \xi\| \leq \delta$.

На рис. 3 приведены графики трех различных функций измерения фокуса и найденные множества Λ_ξ (отмеченные вертикальными линиями) для 1-ой и 2-ой функции. Для 3-ей функции множество Λ_ξ пусто, что свидетельствует о неадекватности модели. На рис. 4 представлены графики зависимости функционала невязки $\|\xi - P_{V_\lambda} \xi\|^2$ от параметра $\lambda \in \Lambda_n$ для этих сигналов. Интервалы возможных значений параметра $\lambda \in \Lambda_n$ получаются как интервалы наименьшей длины, включающие области изменения параметра, для которых график зависимости функционала невязки $\|\xi - P_{V_\lambda} \xi\|^2$ от $\lambda \in \Lambda_n$ лежит ниже прямой $\|\xi - P_{V_\lambda} \xi\|^2 = \delta^2 = 3.6$, соответствующей максимальному значению шума.

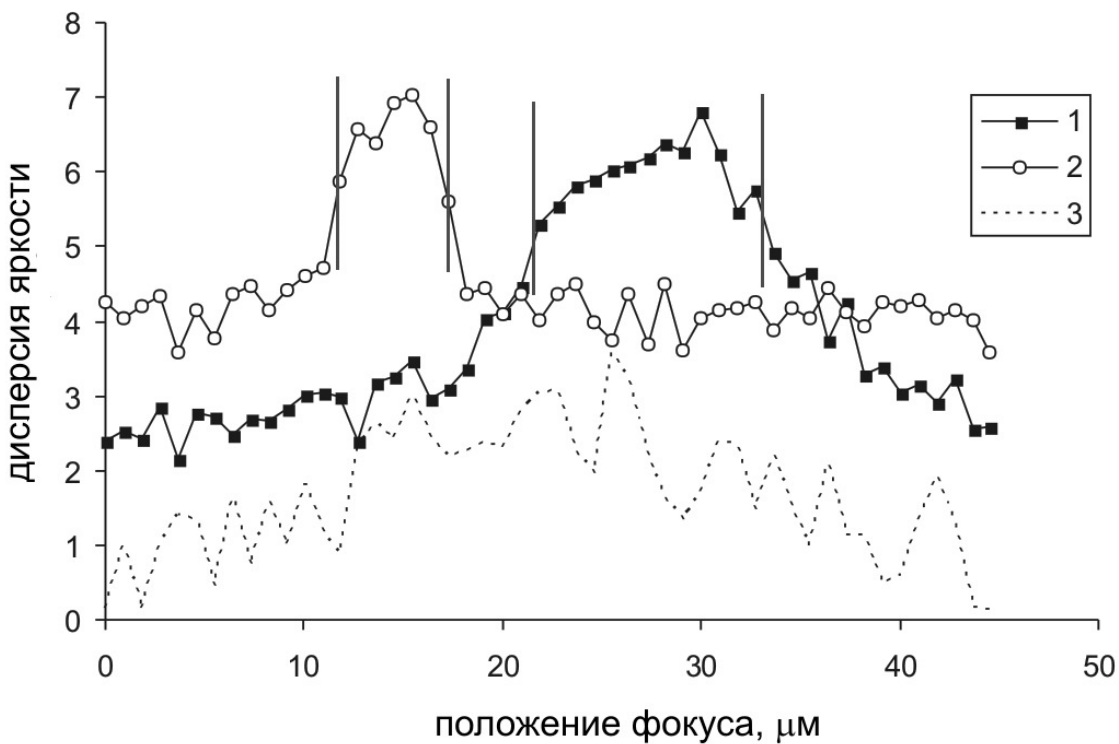


Рис. 3. Зависимость дисперсии яркости в окрестности фиксированной точки поля зрения (вертикальная ось) от положения фокуса (горизонтальная ось), вертикальными линиями отмечены границы множеств Λ_ξ на каждом сигнале.

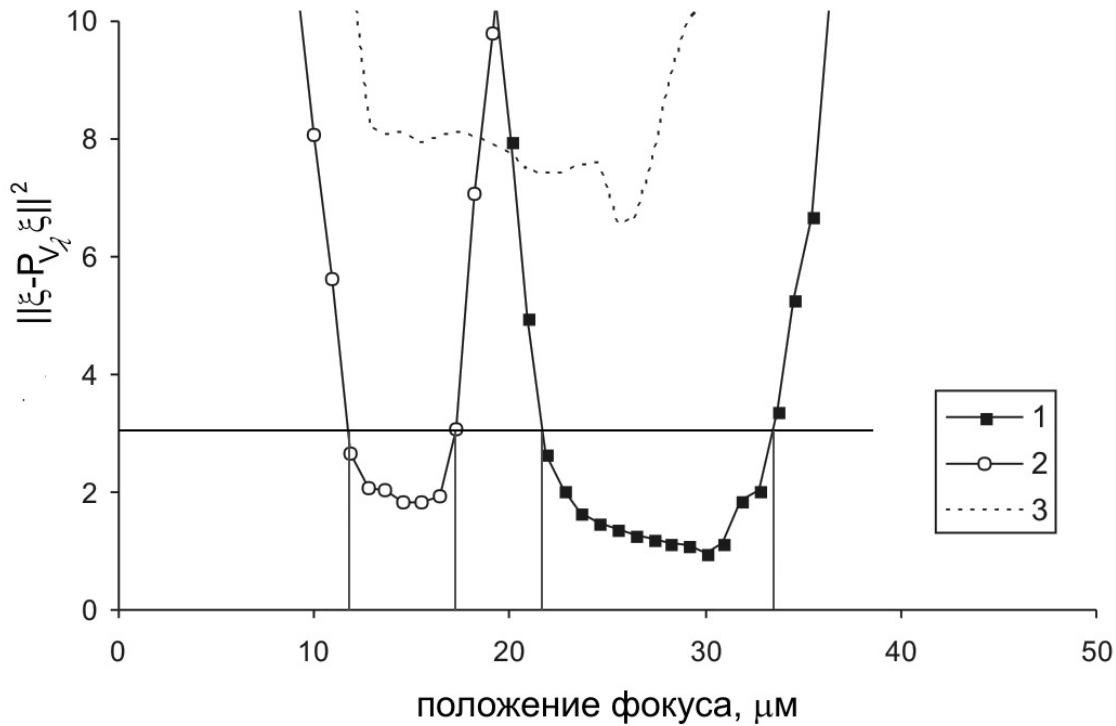


Рис. 4. Зависимость функционала невязки $\|\xi - P_{V_\lambda} \xi\|^2$ (вертикальная ось) от $\lambda \in \Lambda_n$ (горизонтальная ось) для сигналов 1, 2 и 3, изображенных на Рис.1. Горизонтальной линией отмечен уровень шума $\delta^2 = 3.6$.

В **третьем параграфе** рассматривается решение задачи оценки параметра λ при условии, что шум v является нормально распределенным случайным элементом евклидова пространства R_n с нулевым математическим ожиданием и диагональной матрицей корреляции $\sigma^2 I$: $v \sim N(0, \sigma^2 I)$. Такая модель обозначена как $[V_\lambda, \Lambda, N(0, \sigma^2 I)]$.

Мерой согласия реализации ξ с предположением $\xi \sim N(f, \sigma^2 I)$, $f \in V_\lambda$, является надежность $\alpha_\lambda(\xi)$ этой гипотезы при альтернативе $f \notin V_\lambda$, которая определена как вероятность

$$\alpha_\lambda(\xi) = P\left(\|\eta - P_{V_\lambda} \eta\|^2 \geq \|\xi - P_{V_\lambda} \xi\|^2\right), \quad (3.)$$

где $\eta \sim N(\mu, \sigma^2 I)$, а $\mu = P_{V_\lambda} \xi$. Иными словами, надежностью рассматриваемой гипотезы $f \in V_\lambda$ при альтернативе $f \notin V_\lambda$ является вероятность получить в

эксперименте (1) результат, согласующийся с гипотезой так же, как ξ или хуже³. Для решения задачи оценки параметра λ в такой модели предлагается построить множество $\Lambda_p(\xi)$, оценивающее параметр λ с гарантированной надежностью: $\Lambda_p(\xi) = \{\lambda \in \Lambda : \alpha_\lambda(\xi) \geq p\}$.

Оценка параметра λ может быть получена с помощью решения задачи на минимум, аналогичной (2):

$$|\lambda_0 - \tilde{\lambda}| = \inf_{\lambda \in \Lambda} \sup_{\lambda' \in \Lambda_p(\xi)} |\lambda - \lambda'|$$

Мерой согласия используемой модели с результатом наблюдения служит величина $\alpha(\xi) = \inf_{\lambda \in \Lambda} \alpha_\lambda(\xi)$. Для вычисления надежности (3) предлагается воспользоваться методом Монте-Карло или разработанным в диссертации приближенным методом, который обладает в 100-1000 раз большей скоростью вычислений. В приближенном методе надежность (3) вычисляется по формуле

$$\alpha_\lambda(\xi) = 1 - \Phi\left(\frac{\|\xi - P_{V_\lambda} \xi\| - m_\lambda}{s_\lambda}\right), \text{ где } m_\lambda \text{ и } s_\lambda \text{ находятся экспериментально.}$$

Показано, что m_λ и s_λ могут быть аппроксимированы функциями, зависящими лишь от так называемой устойчивости сигнала к шуму:

$$\eta_\sigma(x_1, \dots, x_n) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n \left[2\Phi\left(\left|\frac{x_i - x_{i-1}}{\sigma}\right|\right) - 1 \right].$$

Построены экспериментальные зависимости $m_\lambda(\eta_\sigma)$ и $s_\lambda(\eta_\sigma)$, и оценена погрешность вычислений надежности с помощью предложенного метода.

На рисунке 5 представлен график функции измерения фокуса, на котором вертикальными линиями отмечено найденное для него множество $\Lambda_p(\xi)$ с $p = 0.85$. На рисунке 6 показан график зависимости надежности $\alpha_\lambda(\xi)$ от параметра $\lambda \in \Lambda$. Интервал возможных значений параметра $\lambda \in \Lambda_n$ получается

³ Пытьев Ю.П. Методы математического моделирования измерительно-вычислительных систем. М.:ФИЗМАТЛИТ, 2004.

как интервал наименьшей длины, включающий область изменения параметра, для которой график зависимости $\alpha_\lambda(\xi)$ т $\lambda \in \Lambda_n$ лежит выше прямой $\alpha_\lambda(\xi) = 0.85$, что соответствует минимальной надежности гипотезы. На рисунке 7 отображаются графики двух различных оценок, полученных в 3 и 4 параграфах, для одного и того же смоделированного сигнала в зависимости от дисперсии шума (шум считается нормально распределенным). Видно, что стохастическая оценка является более точной, что достигается использованием информации о распределении шума.

В **пятой главе** рассмотрены вопросы, связанные с реализацией разработанных методов. Методы были реализованы на оптическом микроскопе Leica INM 300 с цветной камерой Leica DC300. Для управления микроскоп подключался к компьютеру через RS-232 порт. В **первом параграфе** приведена схема хода лучей и характеристики микроскопа. Рассмотрены вопросы оптимального разрешения изображения. Во **втором параграфе** более подробно рассматриваются алгоритмы вычисления проекции и сглаживания рельефа поверхности. Разработан быстрый приближенный алгоритм вычисления $\|\xi - P_{V_\lambda} \xi\|^2$ для $\lambda = 1..n$, имеющий $O(n^2)$ количество вычислительных операций. Оценена его погрешность, которая на практике пренебрежимо мала.

В **третьем параграфе** описана общая схема работы программно-аппаратного комплекса. Последовательно захватываются 20-200 изображений (в зависимости от требуемой точности реконструкции) придвигающемся столике микроскопа. Для каждой точки изображения рассчитывается функция измерения фокуса как дисперсия яркости изображения в ее окрестности. С помощью анализа функции измерения фокуса одним из предложенным в работе методов определяется высота рельефа поверхности с погрешностью, а также рассчитывается адекватность модели. Из полученного рельефа убираются точки с низкой адекватностью, полученный рельеф сглаживается.

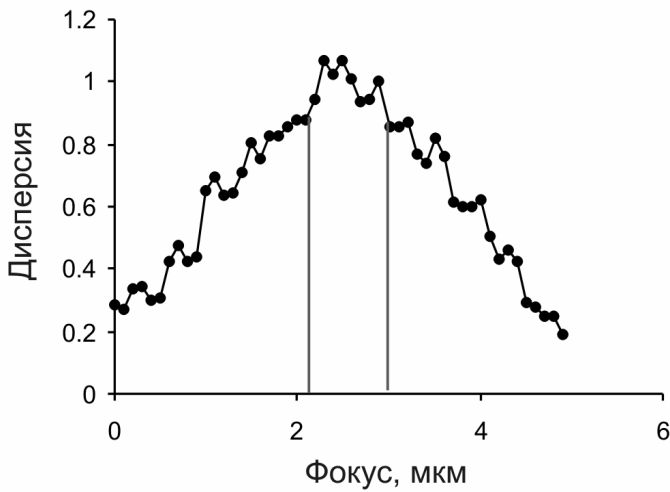


Рис. 5. Кривая измерений фокуса (дисперсия). Вертикальными линиями отмечена найденная оценка положения максимума с надежностью 0.85

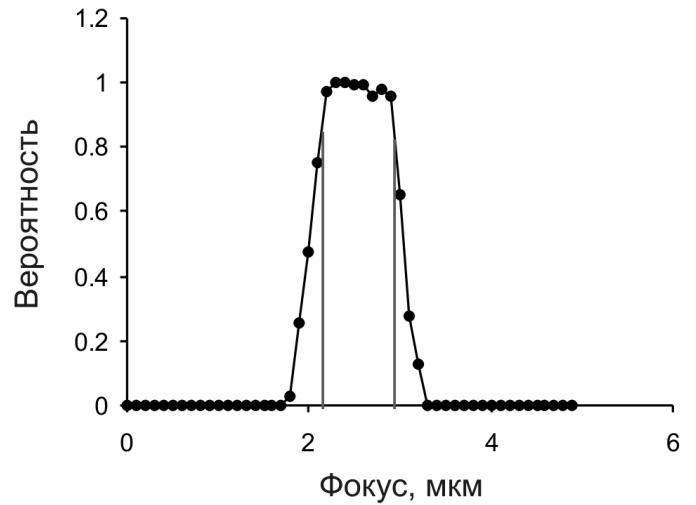


Рис. 6. Надежность $\alpha_\lambda(\xi)$, равная вероятности (3.), вычисленная методом Монте-Карло. Вертикальными линиями отмечен интервал $\alpha_\lambda(\xi) > 0.85$

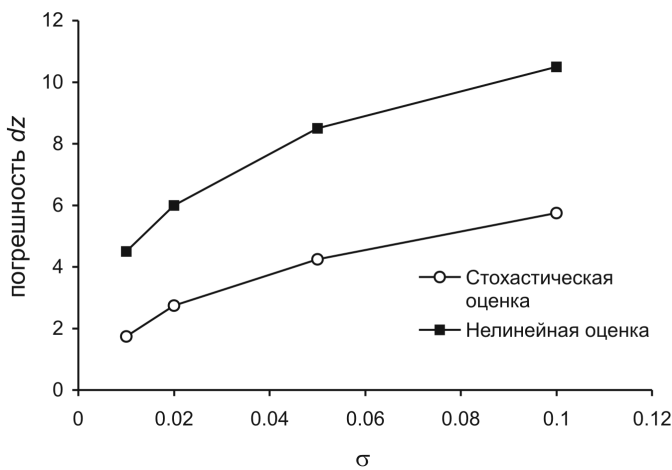


Рис. 7. Сравнение нелинейной и стохастической оценок для различных шумов. По вертикальной оси отложена точность оценки в количестве координат. Число координат может быть дробным, т.к. для нахождения границ $\Lambda_p(\xi)$ используется интерполяция.

В четвертом параграфе созданные методы используются при активном освещении, наносящем текстуру на объект. Показано, что применение активного освещения позволяет реконструировать поверхности практически любых объектов и заметно уменьшать погрешность измерений.

В пятом параграфе приведены результаты работы метода. Метод применялся для реконструкции объектов микроэлектроники: дефектов, структур

на кремнии, поверхности металлов и т.д. Применение метода вместе с активным освещением позволило достигнуть такой точности измерений высоты рельефа поверхности, как 0.1 мкм и ниже. В отдельных случаях точность измерений достигает 50 нм. Горизонтальное разрешение при этом составляет около 0.4 мкм. На рисунке 8 показаны результаты сравнения разработанного метода с высокоточным контактным профилометром Dektak V200SL фирмы Veeco Instruments. Точность профилометра в данном случае составляет 0.01 мкм. Точность разработанного метода – 0.1 мкм. Видно, что результаты измерения высоты рельефа поверхности совпадают в пределах указанной точности.

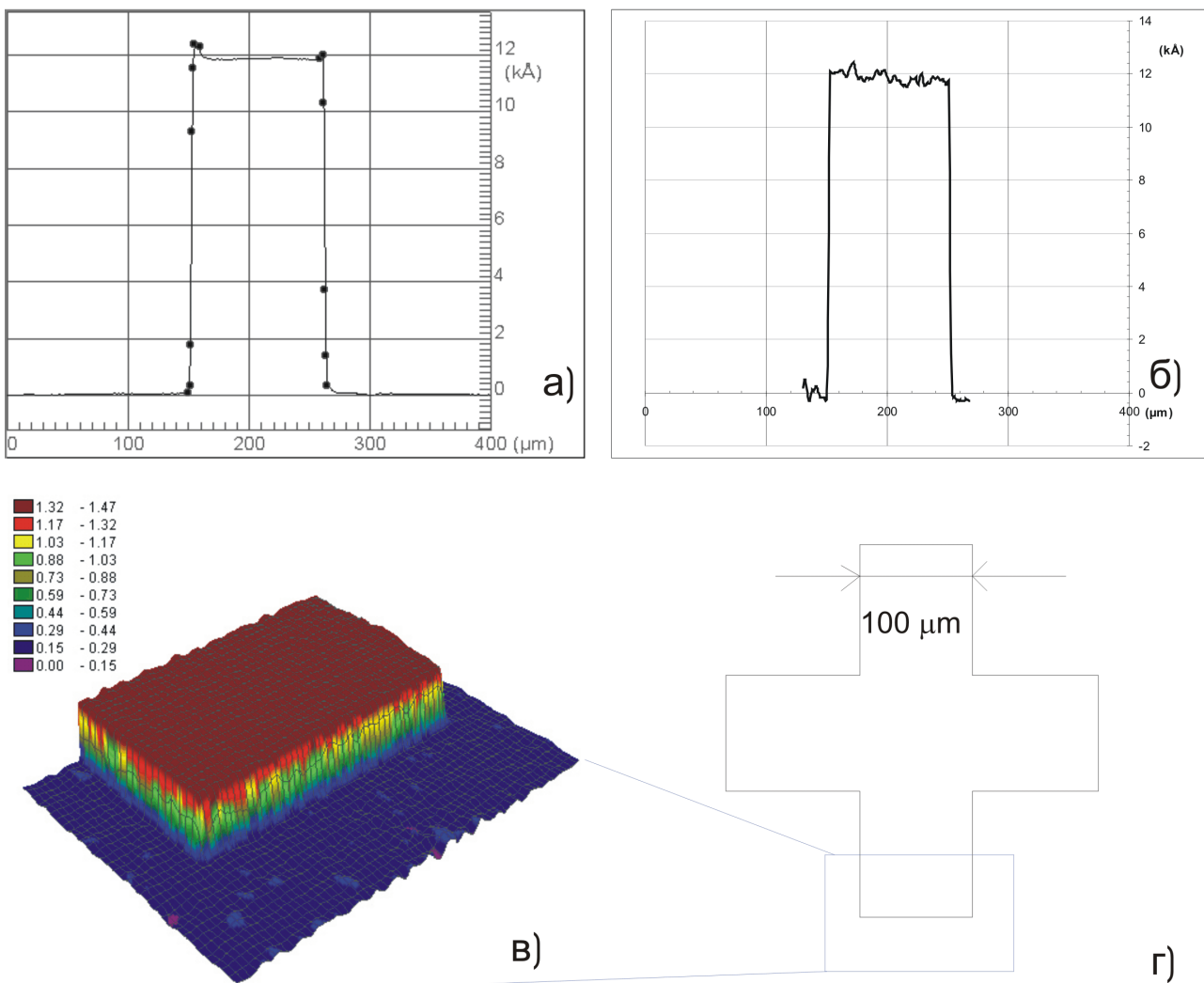


Рис. 8. Сравнение разработанного метода с профилометром Dektak V200SL фирмы Veeco Instruments. а) – профиль высоты части метки в кремнии, полученный с помощью профилометра; б) – профиль части метки в кремнии, полученный с помощью разработанного метода (4 объектив, 50х, NA=0.8) ; в) – результаты реконструкции части метки с помощью разработанного метода; г) – общий вид метки в кремнии

На рисунках 9, 10 показаны результаты реконструкции для некоторых объектов микроэлектроники.

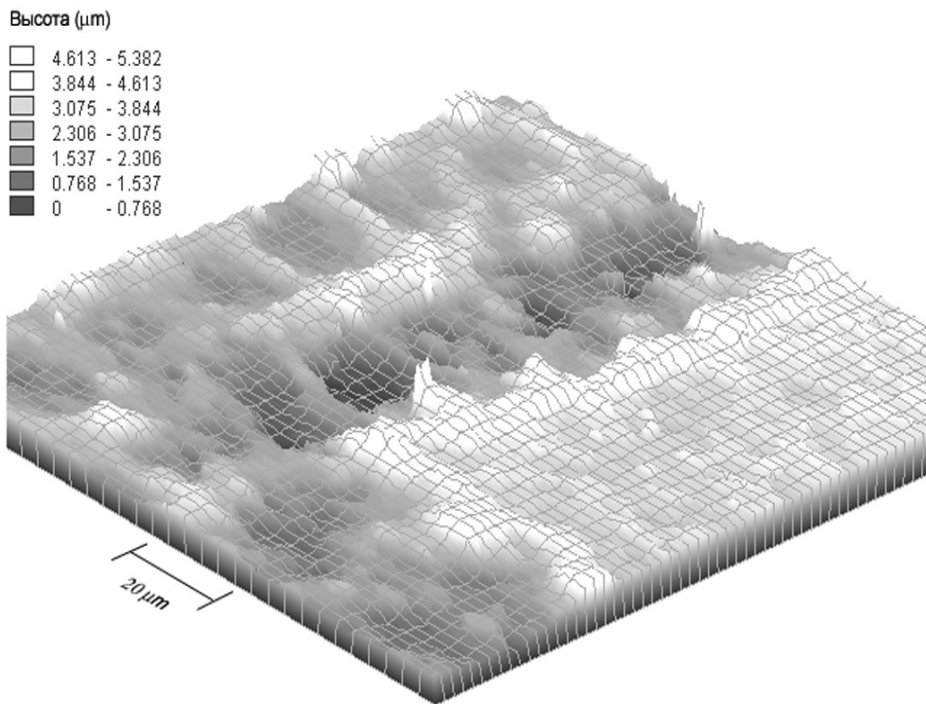


Рис. 9. Реконструированный рельеф поверхности металлического корпуса микросхемы с выжженной лазером цифрой. Глубина канавок – 3 мкм. Погрешность измерения высоты рельефа – 0.5 мкм.

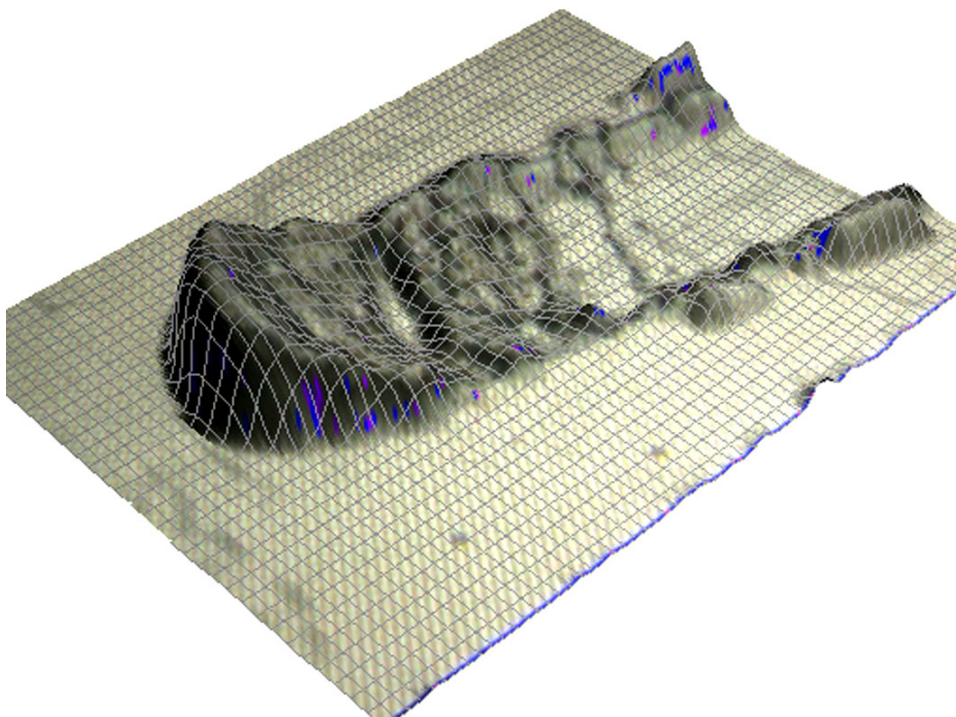


Рис. 10. Реконструированный рельеф поверхности царапины в металле на контактной площадке, оставленной зондом. Размер поля зрения 24x30 мкм. Погрешность измерения высоты рельефа поверхности 0.1 мкм. Высота рельефа - 3 мкм.

Результаты диссертации

- Разработаны морфологические методы реконструкции трехмерного рельефа поверхности с помощью оптического микроскопа.
- Построена строгая математическая модель формирования изображения. На ее основании сделано заключение о классе функций измерения фокуса. Построена форма кривой измерений фокуса как множество унимодальных сигналов.
- Построен проектор на форму кривой измерений фокуса как нелинейный проектор на конус в евклидовом пространстве. Разработаны методы приближенного расчета проекции сигнала на форму.
- Разработаны методы оптимального оценивания высоты рельефа поверхности. Получены оценки точности и адекватности модели.
- Описана реализация разработанного метода. Рассмотрены вопросы оптимального разрешения изображения, гладкости сигнала и применения активного освещения.
- Показана эффективность разработанных методов для ряда практических задач в микроэлектронике.

Список публикаций по теме диссертации

1. Захарченко А.А. Морфологические методы анализа многофокусных изображений. // Труды 12-й Международной конференции «Математические методы распознавания образов» ММРО-12, Москва 2005, ВЦ РАН, с. 335.
2. Захарченко А. Построение рельефа поверхности с помощью оптического микроскопа // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 8/2005, с. 14.
3. Введенский С. Захарченко А. Троицкий В. Измерения субмикронных размеров. Оптический микроскоп с некогерентным освещением. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 1/2005 с. 59.
4. Захарченко А.А., Чуличков А.И. "О морфологических методах анализа многофокусных изображений" // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2006 №5 с. 6
5. Захарченко А.А., Чуличков А.И. "Точность оценки и адекватность модели при минимаксном оценивании параметров формы сигнала" // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2006 №6 с. 11
6. Захарченко А.А., Чуличков А.И. Морфологические методы анализа многофокусных изображений - 13-я Междунар. конф. «Математика. Компьютер. Образование.» Дубна, 2006, с.141